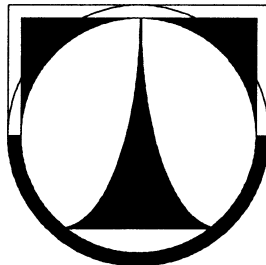


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Katedra vozidel a motorů



**MALÝ SPALOVACÍ MOTOR NA ALKOHOLOVÁ
PALIVA**

SMALL ENGINE COMBUSTING ALCOHOL FUELS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

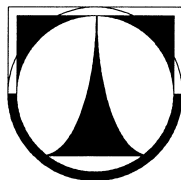
Miroslav TRNKA

duben 2012

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Katedra vozidel a motorů



Obor 2302T010

Konstrukce strojů a zařízení

Zaměření

Kolové dopravní a manipulační stroje

**MALÝ SPALOVACÍ MOTOR NA ALKOHOLOVÁ
PALIVA**

SMALL ENGINE COMBUSTING ALCOHOL FUELS

Diplomová práce

KVM – DP –634

Miroslav Trnka

Vedoucí diplomové práce: Michal Vojtíšek, M.Sc. Ph.D.

Konzultant diplomové práce: Ing. Martin Pechout

Počet stran: 56

Počet obrázků: 15

Počet příloh: 3

Počet tabulek: 7

duben 2012

Místo pro vložení originálního zadání DP (BP)

MALÝ SPALOVACÍ MOTOR NA ALKOHOLOVÁ PALIVA

Anotace

Diplomová práce se zabývá obecnou problematikou použití alkoholových paliv v zážehových motorech.

Cílem práce je teoretické a experimentální vyšetření možnosti provozu malých spalovacích motorů na butanol a směsi butanolu s benzínem různých koncentrací. Dále je popsána startovatelnost motoru za nízkých teplot a zkoumána kompatibilita alkoholových paliv s materiály použitými v motoru.

Klíčová slova: spalovací motor, butanol, biopaliva, alkoholová paliva

SMALL ENGINE COMBUSTING ALCOHOL FUELS

Annotation

The thesis deals with general area of using alcohol fuels in combustion engines.

The aim of the thesis is theoretical and experimental investigation of possibilities of small combustion engines operating with butanol and blends of butanol and gasoline of various concentrations. Further it describes startability of engine at low temperatures and examines the compatibility of alcohol fuels and materials used in the engine.

Key words: combustion engine, butanol, biofuels, alcohol fuels

Zpracovatel:

TU v Liberci, Fakulta strojní, Katedra vozidel a motorů

Dokončeno :

2012

Archivní označení zprávy:

Prohlášení k využívání výsledků diplomové práce

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé diplomové práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé diplomové práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užít svou diplomovou práci či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

V Liberci dne 20.4.2012

.....

Miroslav Trnka

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce Michalu Vojtíškovi, M.Sc., Ph.D. za odbornou pomoc, konzultace a cenné rady a konzultantu Ing. Martinu Pechoutovi také za odbornou pomoc, konzultace, cenné rady a ochotu při realizaci experimentu a často nesnadných měření v laboratořích KVM.

Velký dík patří rodině a všem mým blízkým, kteří mě po celou dobu studia podporovali a byli mi pevnou oporou.

Seznam symbolů a jednotek

H_S	výhřevnost směsi	$[MJ \cdot m^{-3}]$
H_U	výhřevnost směsi	$[MJ \cdot kg^{-1}]$
η_{CH}	chemická účinnost	$[-]$
ρ_V	hustota vzduchu	$[kg \cdot m^{-3}]$
λ	součinitel přebytku vzduchu	$[-]$
L_t	teoretická spotřeba vzduchu	$[kg \cdot kg^{-1}]$
O_t	teoretická potřeba kyslíku	$[kg \cdot kg^{-1}]$
O_2	kyslík	
SO_x	oxidy síry	
NO_x	oxidy dusíku	
CO	oxid uhelnatý	
CO_2	oxid uhličitý	
HC	uhlovodíky	
P	výkon	$[kW]$
M_t	točivý moment	$[Nm]$
ω	úhlová rychlost	$[rad \cdot s^{-1}]$
ν	kinematická viskozita	$[m^2 \cdot s^{-1}]$
n_m	otáčky motoru	$[min^{-1}]$
n_c	otáčky čerpadla	$[min^{-1}]$
i	převodový poměr	$[-]$
ψ	fluidní hodnota odpařování (dle Reida)	$[-]$
q	měrný objem	$[cm^3 \cdot ot.^{-1}]$
p_1	maximální pracovní tlak	$[Pa]$
p_3	maximální špičkový tlak	$[Pa]$
n_{min}	minimální otáčky	$[min^{-1}]$
n_{max}	maximální otáčky	$[min^{-1}]$
Q	průtok čerpadla	$[m^3 \cdot s^{-1}]$
p_{vst}	tlak na vstupu	$[Pa]$
$p_{výst}$	tlak na výstupu	$[Pa]$
Δp	rozdíl tlaků	$[Pa]$
M_m	točivý moment motoru	$[Nm]$
M_s	točivý moment snímaný	$[Nm]$

m_L	hmotnost vzduchu	[kg]
m_P	hmotnost paliva	[kg]
$\rho_{\text{benzín}}$	hustota benzínu	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
ρ_{ethanol}	hustota ethanolu	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
ρ_{E85}	hustota E85	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
ρ_{butanol}	hustota butanolu	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$

Seznam zkratek

MTBE	methylercbutylether
MEŘO	methylestery řepkového oleje
OČ	oktanové číslo
OHV	over head valve (rozvod s vačkovou hřídelí umístěnou v bloku motoru)
H.Ú.	horní úvrat'
PLC	programmable logic controller
E85	směs ethanolu s benzínem (číslo 85 \approx objem ethanolu ve směsi)
BU50	směs butanolu s benzínem (číslo 50 \approx objem butanolu ve směsi)
PVC	polyvinylchlorid
HDPE	high density polyethylen
NBR	nitrile butadiene rubber

OBSAH

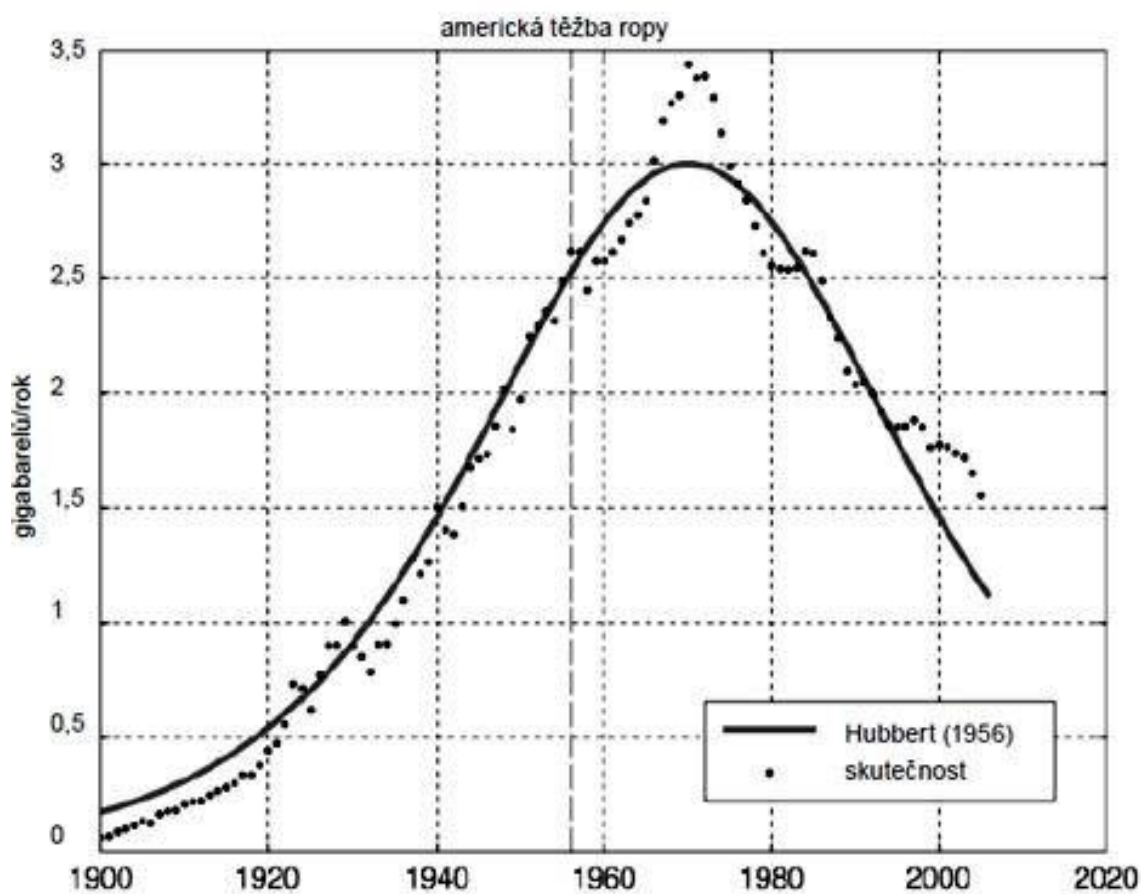
1	Úvod	9
2	Obecná problematika spalování alternativních paliv ve vybraných aplikacích	11
2.1	Malé spalovací motory - použití	11
2.2	Alkoholová paliva pro spalovací motory	11
3	Zkušební zařízení	16
3.1	Spalovací motor	16
3.2	Zkušební stav	18
3.3	Princip měření	23
4	Provozní zkoušky	25
4.1	Spalování benzínu	25
4.2	Spalování butanolu	26
4.2.1	Směs butanol – benzín různých koncentrací	26
4.2.2	Spotřeba paliva	27
4.2.3	Provoz motoru za nízkých teplot	32
4.2.4	Zhodnocení a navržení změn	33
5	Kompatibilita butanolu s ostatními materiály	34
5.1	Dopravní vedení a nádrž	34
5.2	Spalovací motor	36
5.3	Těsnící prvky	38
6	Závěr	39
	Seznam použité literatury	41
	Seznam obrázků	44
	Seznam tabulek	45
	Seznam příloh	46

1 ÚVOD

Lidstvo se od svého prvopočátku posunuje neustále vpřed. Člověk překonává další a další hranice, kterých bylo dosaženo v minulosti, vynalézá nové věci a objevuje nové principy, které nám více či méně usnadňují život. Jedním z nejvýznamnějších objevů je spalovací motor.

První čtyřdobý spalovací motor, který využíval benzín, sestrojil v roce 1876 německý inženýr Nicolaus Otto. Ve srovnání s parním strojem, který v té době dominoval, byl spalovací motor menší, lehčí a postupem času i tišší, čistší a především účinnější. Vynález spalovacího motoru dal také impuls odbytu a zpracování ropy.

Za těch více než 135 let, co využíváme jako paliv spalovacích motorů ropných frakcí, např. benzínu, nafty nebo petroleje, se objem vytěžené ropy dosti měnil. Jedna z teorií, tzv. Hubbertova, říká, že od počátku ropné těžby docházelo k nárůstu vytěženého objemu, a to až do 70. let 20. století, kdy došlo k ropnému zlomu a od té doby dochází k poklesu. Graf objemu vytěžené ropy se nazývá Hubbertova křivka.



Obrázek 1: Hubbertova křivka výtečnosti ropy [http://cs.wikipedia.org/wiki/Hubbertova_křivka]

Zde je uvedeno několik teorií, dle Hirschovy zprávy [1], kdy jaký autor uvádí, že dojde k ropnému vrcholu Bakhtiari: 2006-2007, Skrebowski: po roce 2007, Deffeyes: do roku 2009, Goodstein: do roku 2010, World Energy Council: po roce 2010, Laherrère: 2010-2020, EIA: 2016, Cambridge Energy Research Associates: po roce 2020, Shell: 2025 a později, OPEC: nikdy. I když se tyto teorie více či méně liší v datech, kdy bude dosaženo ropného vrcholu, shodují se v tom, že objem těžby ropy bude klesat velmi pozvolna. Pokles je způsoben několika aspekty. Jsou jimi velikost ropných nalezišť, čím dál větší náročnost těžby, ať už energetická či ekonomická a pak také umístění ložisek v oblastech, kde by jakýkoliv únik ropy mohl způsobit nedozírné ekologické důsledky. Pokud vezmeme v úvahu klesající objem vytěžené ropy, byť jen pozvolný, a zvyšující se počet automobilů, je zřejmé, že i přes snahu výrobců automobilů vyvíjet a používat motory s co nejnižší spotřebou, nemohou ropné produkty plně pokrýt poptávku po palivu pro spalovací motory. Možnosti řešení jsou dvě – omezit provoz automobilů, což není zrovna reálné, a nebo použít palivo, které by nebylo ropnou frakcí, ale naopak z obnovitelných zdrojů.

Tato práce se zabývá nahrazením benzínu směsí benzínu s alkoholovým palivem různých koncentrací a řešením, za jakých podmínek lze motor provozovat bez úprav, event. navrhnout úpravy tak, aby byly zachovány nebo vylepšeny výkonové parametry motoru.

2 OBECNÁ PROBLEMATIKA SPALOVÁNÍ ALTERNATIVNÍCH PALIV VE VYBRANÝCH APLIKACÍCH

2.1 Malé spalovací motory - použití

Malé spalovací motory jsou určeny na nejširší použití, zejména pak pro drobnou stavební, zemědělskou, zahradní a komunální techniku, jako jsou zahradní traktory, sekačky, elektrocentrály, křovinořezy, rozbrušovací stroje, apod. Dále jich může být použito jako pohonu čerpadel, jízdních kol, různých modelů nebo malých motocyklů. Tyto motory se vyrábí v nejrůznějších technických variantách a provedeních – od levnějších variant pro běžné použití až po varianty určené pro nejnáročnější celoroční nasazení v těch nejtěžších provozních podmínkách.

2.2 Alkoholová paliva pro spalovací motory

Paliva pro spalovací motory mohou být buď alternativní nebo substituční. Alternativní paliva jsou taková, která umožňují provoz bez větších konstrukčních změn a v plné míře nahrazují původní palivo. Substituční paliva naopak nedokáží 100% nahradit původní, ale substituují pouze jeho část. Důvodem může být hrozící poškození nějaké části motoru, nežádoucí účinky vůči životnímu prostředí nebo třeba vysoká ekonomická náročnost. Příkladem alternativních paliv je dřevoplyn, který byl pro nedostatek benzínu a nafty používán během druhé světové války, zemní plyn nebo také vodík. Substitučními palivy jsou tzv. oxibenzíny, což jsou sloučeniny benzínu s přísadou látek obsahujících kyslík, např. MTBE (methyltercbutylether), nebo methanol či ethanol. Methanol byl ale v minulosti používán i jako alternativní palivo, kdy zcela nahrazoval benzín u plochodrážních motocyklů již před druhou světovou válkou.

Vlastnosti jednotlivých alkoholů jsou odlišné. Některé mají vyšší oktanové číslo než benzín, jiné zase menší. Co mají ale společné, je nižší energetická hodnota, což znamená nárůst spotřeby paliva. Zvýšení spotřeby paliva lze předejít zvýšením kompresního poměru. Další nevýhodou je špatná startovatelnost při nižších teplotách, kdy u směsí zplyněných alkoholů nedochází k zážehu. Tyto problémy lze odstranit používáním iniciačních palivových složek jako např. izopentanu nebo dimethyletheru.

Alkoholy, které připadají v úvahu pro použití ve spalovacích motorech, jsou methanol, ethanol a butanol. Přehled jejich základních palivářských vlastností ve srovnání s nejpoužívanějším benzínem Natural 95 uvádí *Tabulka 1*.

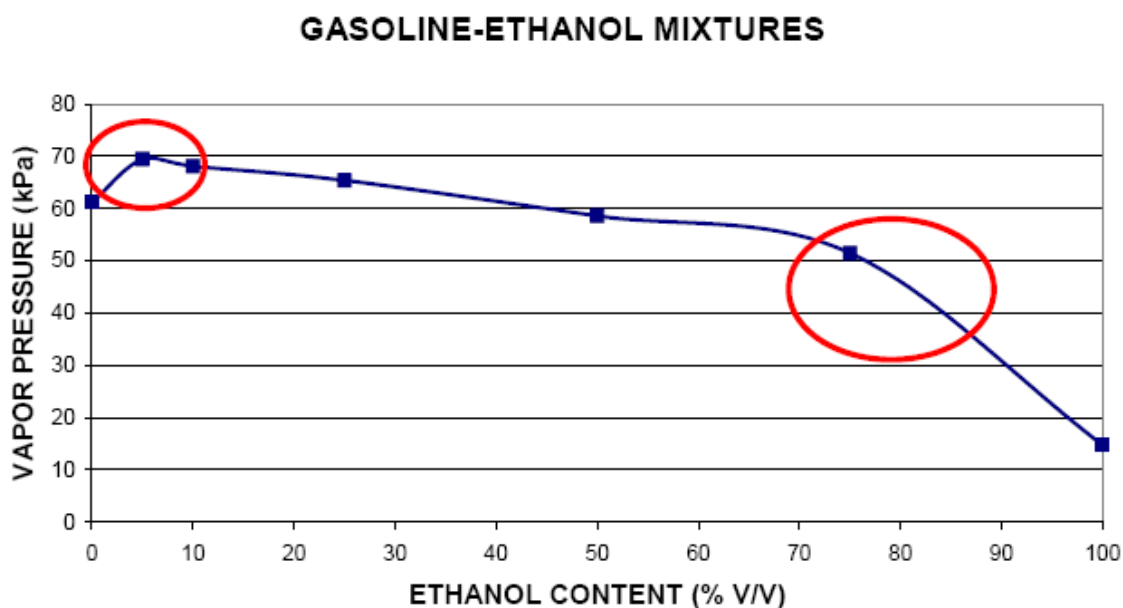
Tabulka 1: Vlastnosti paliv [2], [3]

Parametr	Methanol	Ethanol	Butanol	Natural 95
Bod varu [°C]	64,5	78,3	83	99
Hustota při 15 °C [kg·m ⁻³]	790	789,4	810	743
Kinematická viskozita při 20 °C [mm ² ·s ⁻¹]	0,75	1,52	3,64	0,4-0,8
Výhřevnost [MJ·kg ⁻¹]	18,73	26,88	32	43,68
Tlak par dle Reida –RVP [kPa]	31,7	19,3	18,6	60-90
Oktanové číslo OČ	105	106	86	95
Obsah kyslíku [% hm.]	49,9	34,7	21,6	<2,7

Methanol (CH₃OH) je čirá kapalina, bez zápachu, značně toxická – jed 1. třídy. Dříve vystupoval jako vedlejší produkt při výrobě dřevěného uhlí. Dnes se vyrábí ze syntézního plynu, který je získáván z těžkého oleje nebo zemního plynu, zplyněním uhlí nebo destilací dřeva. Na vysoce oktanové palivo lze methanol převést při relativně nízkých nákladech. Výhodou methanolu je, že neobsahuje síru a znečištění ovzduší jeho spalováním je velmi nízké. V porovnání s benzínem má methanol vyšší oktanové číslo, tudíž motor může mít vyšší kompresní poměr a tedy i vyšší účinnost. Hlavní nevýhodou z hlediska zdraví je jeho toxicita, a to jak při vdechnutí, tak i při působení látky na kůži, takže tankování je možné jen na volném prostranství a nasátí methanolu ústy či případné čištění karburátoru profukováním ústy může být smrtelně nebezpečné. Další nevýhodou je omezená mísitelnost methanolu s benzínem a také možnost vzniku dvojvrstvy již na malém objemovém množství vody. Dále také methanol způsobuje rychlejší korozi a odstraňuje olej z míst, kde je ho potřeba, například stěny válců. Negativně působí i na plastické hmoty, které jsou v dopravních cestách, jako třeba pryžová vedení paliva, plastové nádrže nebo plastové plováky v karburátoru. Jako nejvhodnější se jeví obsah alkoholu do 20 %. Další nevýhodou je, že hoří neviditelným plamenem, tudíž hrozí riziko popálení. Ekonomickou nevýhodou výroby methanolu z biomasy je jeho vysoká cena v porovnání se syntetickým methanolem vyráběného ze zemního plynu a dvakrát vyšší náklady v porovnání s výrobou benzínu. Z důvodu nižší

energetické hustoty je spotřeba methanolu zhruba dvakrát vyšší než u nafty. Z toho plyne menší akční rádius dojezdu. Při studených startech může také vznikat nepříjemný formaldehydový zápach.

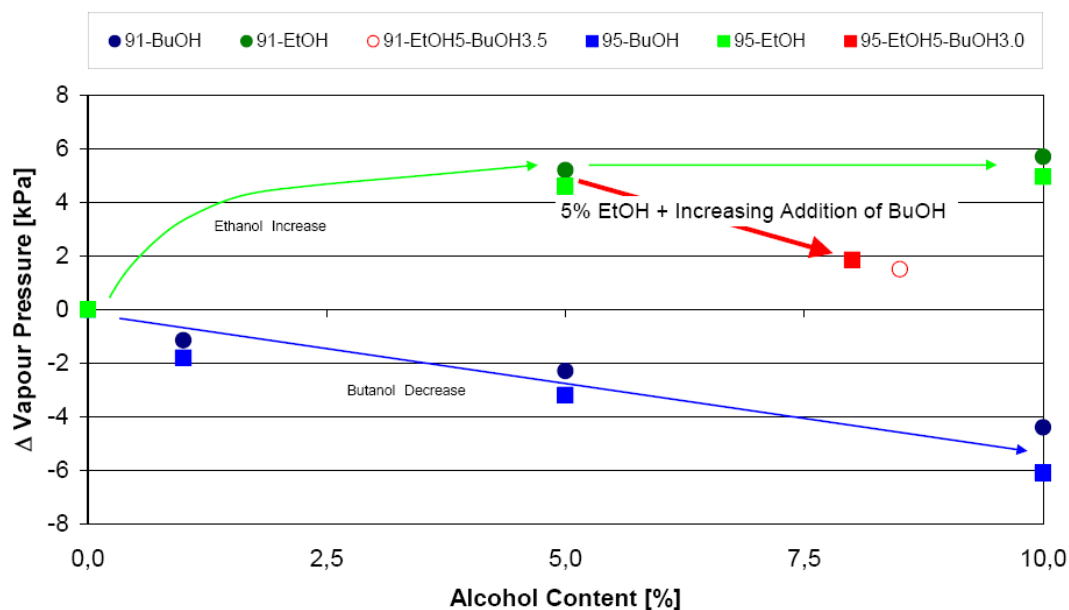
Dalším palivem je **ethanol** (C_2H_5OH). Ethanol je vysokooktanové palivo a jeho přidáváním do benzínu se zvyšuje hodnota oktanového čísla této palivové směsi. Bioethanol je označení pro ethanol vyrobený technologií alkoholového kvašení, tzv. fermentace, probíhající na cukerných roztocích z biomasy, tedy obnovitelných surovin. Obvykle je vyráběn z rostlin obsahujících větší množství škrobu a sacharidů. Vedle rostlin obsahujících škrob, jako jsou kukuřice, obilí a brambory, jsou nejčastěji používanou surovinou cukrová třtina a cukrová řepa. Zatímco rostliny obsahující cukr se kvasí přímo, musí se u rostlin s obsahem škrobu škrob nejprve enzymaticky přeměnit na cukr. Vyrobený bioethanol se může přímo používat ve spalovacích motorech jako pohonná hmota. V praxi se běžně čistý ethanol nepoužívá, spíše se mísí v přesně daném procentu s bezolovnatým benzínem. Mezi výhody takového paliva patří nižší náklady na jeho výrobu, zvýšení oktanového čísla a snížení množství nebezpečných spalín. Spaliny neobsahují popel a síru a mají oproti benzínu nižší podíl oxidu uhličitého a oxidů dusíku. Používání ethanolu není na rozdíl od methanolu pro člověka toxické. Ethanol má sice v porovnání s automobilovým benzínem nižší tlak par (*Tabulka 1*), ale přidáním ethanolu do benzínu dochází k vytvoření azeotropické směsi, což vede ke zvýšení tlaku par pro nižší koncentrace ethanolu (*Obrázek 2*).



Obrázek 2: Tlak par ethanol-benzínových směsí v závislosti na obsahu ethanolu [4]

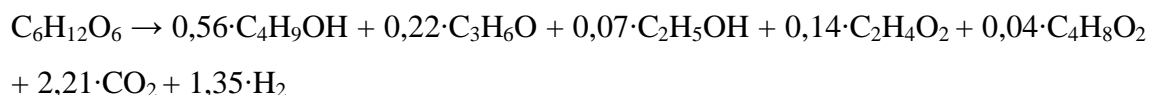
Zvýšení tlaku par směsi zvyšuje optimální vzplanutí a její účinnost, viz. *Obrázek 3*. Směs benzínu s nízkým obsahem ethanolu (do 15%) vykazuje lepší startovatelnost motoru za nižších teplot okolí. Při vyšších okolních teplotách ale může mít vyšší odpařivost biolihu za následek vznik bublinek v palivovém systému, což stejně jako jeho hygroskopické vlastnosti, tj. schopnost alkoholu vázat na sebe vodu, může způsobovat vyšší korozi dílů. V případě směsného paliva benzin – ethanol pak voda způsobuje jeho rozklad na dvě fáze, přičemž ethanol přechází do vodné fáze, čímž dojde ke zhoršení vlastností paliva. Tomu lze předejít přidáním tzv. kosolventů, což jsou s vodou mísitelné látky, které jsou schopny narušit vnější vazby vody. Obvykle jimi bývají rozvětvené vyšší alkoholy (butanoly) nebo organické metylestery a cyklické étery. Aby se předešlo uvedeným problémům, které způsobuje styk s vlhkostí, je nutné vyloučit dopravu paliva potrubními přepravními systémy. Benzíny obsahující ethanol nelze ani dlouhodobě skladovat. Alkoholy také se vzdušným kyslíkem za tepla zčásti oxidují na aldehydy a ty zčásti na karboxylové kyseliny. Z methanolu vzniká kyselina mravenčí a z ethanolu kyselina octová. Obě působí korozivně na spalovací a výfukový prostor. Toto lze zmírnit přísadou inhibitorů, antioxidantů. Tyto negativní vlastnosti a problémy spojené s využitím ethanolu jako pohonné hmoty jsou hlavními důvody, proč se uvažuje o využití butanolu.

Použití **butanolu** (C_4H_9OH) jako pohonné hmoty v dopravě se jeví jako výhodnější ve srovnání s ethanolem. Butanol je alkohol obsahující čtyři uhlíky, tzn. dvakrát více než ethanol, tudíž má větší energetický obsah, skoro o 30 %. Na rozdíl od ethanolu, může být přidáván do benzínu dle ČSN EN 228 (Motorová paliva-Bezolovnaté benzíny-Technické požadavky a metody zkoušení) ve vyšší koncentraci než ethanol, a to až do 10 % objemového množství, aniž by to vyžadovalo úpravu pohonné jednotky. Butanol je bezpečnější palivo než běžné benzíny, resp. lihobenzínové směsi. Jeho fluidní hodnota odpařování ψ (dle Reida) je 0,33, zatímco u ethanolu 2 a u benzínu 4,5, což znamená, že se méně odpařuje za vyšších teplot, např. v letním období. Přídavek butanolu do lihobenzínové směsi má pozitivní vliv na snížení tlaku par, viz. *Obrázek 3*.

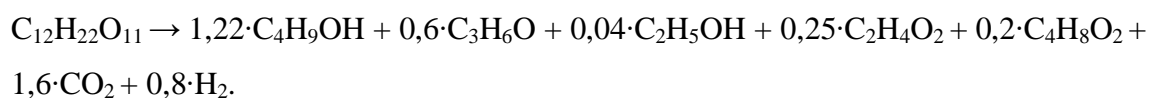


Obrázek 3: Vliv obsahu ethanolu a butanolu ve směsi s benzínem (Normal 91 a Natural 95) na tlak par [2]

Na rozdíl od ethanolu nepohlcuje vodu a může být bez rizika koroze dopravován stávajícími potrubními přepravními systémy. Svými vlastnostmi se nejvíce přibližuje benzínu. Jako látka přírodního původu je butanol dobře biologicky odbouratelný a nepředstavuje ohrožení půdy ani spodních vod. Vyrábí se hydratací butanu nebo fermentací z biomasy pomocí upravených kvasinek, např. z glukosy:



nebo ze sacharosy:



Výtěžek biobutanolu je v porovnání s bioethanolem dvojnásobný. Butanol neprodukuje SO_x . Produkované CO_2 a voda se vrací zpět do ovzduší, ze kterého byly zpracovávány rostlinami přijaty v době vegetace.

3 ZKUŠEBNÍ ZAŘÍZENÍ

3.1 Spalovací motor

Pro tuto práci bylo použito spalovacího motoru Honda GX 31, který je primárně určen jako pohon křovinořezu. Tento typ se však využívá i u jiných ručně nesených strojů jako jsou fukary, plotostřihy, postřikovače, vyžínače, malá vodní čerpadla a generátory. Používá se také jako pohon jízdních kol, motokár, malých motocyklů a také modelů letadel či lodí.



Obrázek 4: Motor Honda GX31

Výhodou těchto motorů je možnost provozu a skladování v plném rozsahu 360°, a to díky rotační pumpě mazacího systému, která umožňuje používat tyto motory ve všech možných polohách, aniž by došlo k problémům s dodávkou oleje a následnému zadření motoru.

Motory Honda řady GX patří mezi nejlehčí čtyřtákní motory na světě, jsou špička ve své třídě v porovnání výkonu a hmotnosti a splňují nejprísnejší světové emisní normy. Vykazují velmi nízké vibrace a jsou snadné na údržbu. Bezvložkový válec motoru je vyroben z hliníkové slitiny s vysokým obsahem křemíku a písty mají vysoce

tvrdou povrchovou úpravu. Přechodem z dvoutaktních motorů na čtyřtaktní došlo ke snížení spotřeby o polovinu a snížení emisí až o 86 %. Honda dosáhla 16% snížení hmotnosti oproti ostatním motorům v této kategorii.

Tabulka 2: Specifikace spalovacího motoru HONDA [5]

Model	GX 31
Typ motoru	Zážehový, čtyřtaktní, 1 válec, vzduchem chlazený, rozvod OHV
Vrtání x zdvih [mm]	39 x 26
Zdvihový objem [cm ³]	31
Kompresní poměr	8,0:1
Maximální výkon	1,1 kW při 7000 min ⁻¹
Maximální točivý moment	1,64 Nm při 5400 min ⁻¹
Maximální otáčky [min ⁻¹]	8000
Zapalování	Tranzistorové
Předstih zapalování	27° (před H.Ú.)
Startování	Tahové
Objem palivové nádrže [dm ³]	0,64
Měrná spotřeba paliva [g·kWh ⁻¹]	340
Doporučené palivo	Bezolovnatý benzín s min. OČ 86
Mazání	Kliková skříň řízená tlakem
Množství oleje [dm ³]	0,1
Doporučené provozní teploty okolí [°C]	-5 - +40
Rozměry – d x š x v [mm]	210 x 251 x 250
Suchá hmotnost [kg]	3,4

Tento motor je využíván po celém světě. V mnoha státech USA jsou do benzínu ve zvyšující se míře přidávány látky obsahující kyslík, aby se snížilo množství oxidu uhelnatého a nespáleného paliva ve výfukových plynech. V současné době může objem dosahovat až 10 %. Nejčastějším okysličovadlem bývá ethanol. V EU lze podle specifikace běžného benzínu přidávat 5 % ethanolu. Společnost Honda Motor Co., Ltd. v uživatelské příručce [5] uvádí, že palivo pro tento motor může tvořit směs bezolovnatého benzínu s přísadou do 10 % ethanolu, 15 % MTBE (postupně zakazován

kvůli nepříznivému vlivu na životní prostředí) nebo 5 % methanolu. Palivo obsahující více než 5 % methanolu může způsobit problémy při startování nebo běžném provozu. Může také dojít k poškození kovových, pryžových nebo plastových součástí motoru.

3.2 Zkušební stav

Pro experimentální zkoušky bylo použito stavu, který byl zkonstruován a realizován v průběhu dřívější bakalářské práce [6], v níž je také detailně popsán.

Za účelem přiblížení vlastností je zde toto stanoviště popsáno. Zkušební stav se skládá z testovaného motoru a k němu připojené výkonové brzdě. Ta klade spalovacímu motoru potřebný odpor, který musí spalovací motor překonávat. Stav může být osazen snímači, z jejichž dat je možné měřit teplotu výfukových plynů, otáčky motoru, točivý moment a výkon.

Výkonovou brzdou lze spalovací motor zatěžovat v libovolném provozním režimu a podle naměřených hodnot sestavit různé charakteristiky, což jsou graficky znázorněné závislosti mezi hlavními měřenými veličinami, jako např. výkonem, točivým momentem, středním efektivním tlakem atp. a otáčkami motoru a dalšími důležitými parametry.

Základními možnými měřitelnými charakteristikami spalovacího motoru jsou:

Otáčková (rychlostní) charakteristika, která znázorňuje závislost výkonu a ostatních důležitých veličin motoru v celém rozsahu otáček pro konstantní nastavení ovládacího zařízení (pedálu akcelérátoru) regulujícího výkon motoru.

Zatěžovací charakteristika. Ta se zjišťuje měřením hodnot při udržování konstantních otáček. Přitom se mění nastavení ovládacího zařízení od minimálního po maximální zatížení.

Regulační (nastavovací) charakteristika znázorňuje závislost veličin spalovacího motoru na některé konstrukční veličině charakterizující seřízení (nastavení) motoru.

Úplná charakteristika. Na komplexní posuzování spalovacích motorů z hlediska výkonu, momentu, spotřeby, teplot a dalších vedlejších veličin se v praxi uplatňuje úplná charakteristika, která v jednom diagramu umožňuje zobrazit několik závislostí současně pomocí průsečíkových diagramů.

Mechanický výkon nelze měřit přímo. K získání hodnot výkonu je potřeba využít závislosti mezi výkonem, točivým momentem a úhlovou rychlostí, které získáme ze zatíženého motoru

$$P_m = M_m \cdot \omega \quad (1)$$

K brždění spalovacího motoru Honda je použito hydraulického obvodu tvořeného zubovým čerpadlem a proporcionálním rozvaděčem. Čerpadlo je zapojeno v sérii se spalovacím motorem a je jím poháněno. Zubové čerpadlo přečerpává hydraulický olej, kterému podle potřeby proporcionálním rozvaděčem škrtíme průtok a tím vytváříme potřebný odpor kladený spalovacímu motoru. Poháněné zubové čerpadlo generuje tok hydraulického oleje nasávaného z nádrže. Velikost toku závisí na otáčkách čerpadla, potažmo na otáčkách spalovacího motoru. Z čerpadla proudí olej do proporcionálního rozvaděče, kterým regulujeme průtok hydraulického oleje. Regulací průtoku oleje vytváříme tlak a tím vzniká odpor, který musí čerpadlo překonávat. Nastavení proporcionálního rozvaděče je řízeno PLC systémem. Škrcením průtoku hydraulického oleje proporcionálním rozvaděčem se jeho energie přeměňuje v teplo a olej se zahřívá. Olej na výstupu z proporcionálního ventilu již není pod tlakem, ale olej je zahřátý. Pro udržení jeho pracovní teploty je potřeba jej zchladit. Toho docílíme průtokem hydraulického oleje přes chladič. Z chladičského systému se olej přes filtrační jednotku vrací zpět do nádrže. Olejová nádrž je vybavena dvěma teplotními čidly pro snímání teploty hydraulického oleje a ovládání elektrických ventilátorů instalovaných u průtokového chladiče. První čidlo je nastaveno na teplotu 40 °C a po překročení této hodnoty jsou aktivovány ventilátory. Druhé čidlo je bezpečnostní a je nastaveno na teplotu 70 °C. Po dosažení této teploty se rozsvítí varovná kontrolka přehřátí oleje na ovládacím panelu a obsluha musí přerušit měření a vypnout zařízení.

Pro brždění motoru bylo zvoleno zubové čerpadlo italského výrobce Vivoil, řady XV- 1P. Je nutné, aby čerpadlo bylo dimenzované tak, že pokryje výkonovou křivku spalovacího motoru v celém rozsahu jeho otáček. Čerpadlo není hnáno přímo spalovacím motorem, nýbrž přes převod kvůli potřebám snímače točivého momentu. Převod je „do pomala“ a jeho hodnota je rovna $i = 2,5$, otáčky čerpadla jsou tedy $2,5 \times$ nižší než otáčky spalovacího motoru. Pohon čerpadla zajišťuje vstupní hřídel s upínáním kuželovou stopkou a doplněnou drážkou pro Woodruffovo pero.

Tabulka 3: Parametry čerpadla

Typ čerpadla	XV-1P/1.7
Kód	X1P1802FBBA
Minimální otáčky n_{\min} [min^{-1}]	700
Maximální otáčky n_{\max} [min^{-1}]	6000
Měrný objem q [$\text{cm}^3 \cdot \text{ot.}^{-1}$]	1,56
Maximální pracovní tlak p_1 [MPa]	25
Maximální špičkový tlak p_3 [Mpa]	29

Otáčky čerpadla:

$$i = \frac{n_m}{n_\varepsilon} \Rightarrow n_\varepsilon = \frac{n_m}{i} \quad (2)$$

$$\text{dosazením do (2): } n_\varepsilon = \frac{7000}{2,5} = 2800 \text{ min}^{-1}$$

Průtok čerpadla:

$$Q = q \cdot n_\varepsilon \quad (3)$$

$$Q = 1,56 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{2800}{60} = 0,0000728 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Výkon čerpadla:

Tlak na vstupu do čerpadla p_{vst} lze považovat za nulový, jelikož podtlak, který musí čerpadlo vyvolat pro nasátí oleje z nádrže je zanedbatelný oproti výstupnímu tlaku $p_{\text{výst}}$

$$P_\varepsilon = \Delta p \cdot Q \quad (4)$$

Při rovnosti výkonů (1) a (4) dostaneme:

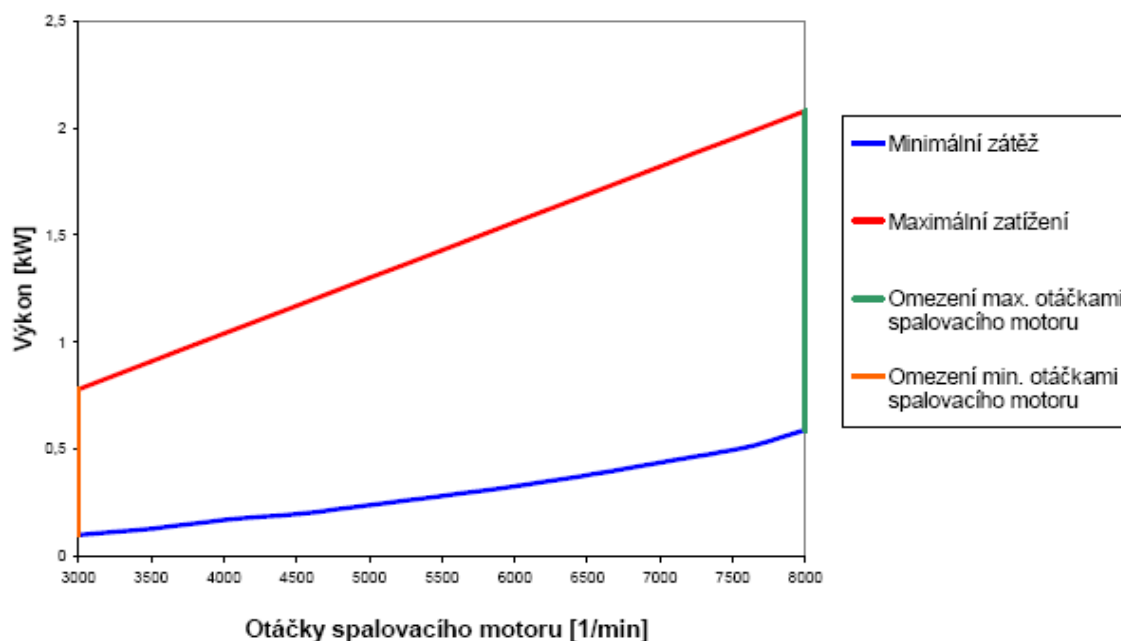
$$\frac{2 \cdot \pi \cdot M_m \cdot n_\varepsilon}{60} = \frac{\Delta p \cdot q \cdot n_\varepsilon}{60}$$

Maximální moment motoru tedy je:

$$M_m = \frac{\Delta p \cdot q \cdot n_\varepsilon}{2 \cdot \pi \cdot n_m} = \frac{\Delta p \cdot q}{2 \cdot \pi \cdot i} = \frac{25 \cdot 10^6 \cdot 1,56 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot \pi \cdot 2,5} = 2,483 \text{ Nm} \quad (5)$$

Maximální točivý moment motoru pro dané čerpadlo může dle výše uvedeného výpočtu dosáhnout hodnoty 2,483Nm. Točivý moment použitého spalovacího motoru dosahuje dle výrobce maximální hodnoty 1,64 Nm. Čerpadlo je tedy nadimenzováno s dostatečnou rezervou.

Brzdové pole zkonstruované brzdy (Obrázek 5) je zprava a zleva omezené přímkami danými maximálními respektive minimálními provozními otáčkami spalovacího motoru. Nejvyšší zatížení výkonové brzdy je dáno maximální možnou hodnotou tlaku hydraulického oleje, se kterou může čerpadlo bezporuchově pracovat a měrným objemem čerpadla na jednu otáčku. Minimální zatížení je dáno ztrátami v pohonu a odporem hydraulické soustavy proti průtoku hydraulického oleje.



Obrázek 5: Brzdné pole hydrodynamické brzdy [6]

Pro regulaci brzdného výkonu je použito proporcionálního rozvaděče. Ten řídí hodnoty průtoku a tlaku hydraulického oleje, které generuje zubové čerpadlo. Na tyto dvě veličiny musí být ventil dimenzován. Maximální průtok ventilem nastane při maximálních otáčkách spalovacího motoru, které podle prospektu jsou 8000 min^{-1} . Pro vyšší bezpečnost je počítáno s vyššími maximálními otáčkami, a to 10000 min^{-1} . Hodnota maximálního tlaku je stejná jako hodnota, kterou může zubové čerpadlo vyvinout.

$$Q = q \cdot n_c = q \cdot \frac{n_m}{i}$$

$$Q = 1,56 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{10000}{2,5} = 6,24 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$$

Pro splnění daných požadavků byl použit proporcionální rozvaděč značky ARGO-HYTOS: PRM7-06 2Z11 / 24 E02S01.

Tabulka 4: Parametry proporcionálního rozvaděče

Jmenovitá světlost [mm]	6
Maximální provozní tlak na vývodech P, A, B [MPa]	32
Maximální provozní tlak na vývodu T [MPa]	21
Tlaková kapalina	Minerální olej výkonových tříd HL, HLP dle DIN 51524
Rozsah provozní teploty kapaliny [°C]	-30 - +80
Maximální teplota okolí [°C]	50
Rozsah provozní viskozity [mm ² ·s ⁻¹]	20 – 400
Jmenovitý průtok při $\Delta p = 1$ MPa [dm ³ ·min ⁻¹]	15

Zvolený proporcionální rozvaděč splňuje požadavky s dostatečnou rezervou.

Rotační pohyb klikového hřídele je přenášen přes odstředivou spojku, která zůstala zachována. Použitý snímač točivého momentu může měřit pouze do 4000 min⁻¹, proto je nutné použití převodu, aby bylo možné měřit hodnoty spalovacího motoru v celém rozsahu jeho otáček. Maximální možný snímaný moment má hodnotu 54 Nm. Převod je umístěn hned za odstředivou spojkou. Snímač točivého momentu je tedy zařazen až za převod. Skutečný snímaný točivý moment má tedy jinou hodnotu než moment spalovacího motoru. Snímaná hodnota je násobkem převodového čísla a točivým momentem spalovacího motoru. Převodové číslo je dále závislé na točivém momentu spalovacího motoru, který má maximální hodnotu $M_{\max} = 1,64$ Nm a hodnotě maximálního možného měřeného momentu snímačem, která je $M_{\text{smax}} = 54$ Nm.

Určení převodového čísla:

Pro určení převodového čísla je počítáno s vyšší hodnotou možných otáček spalovacího motoru $n_{\max} = 10000$ min⁻¹.

$$i = \frac{n_m}{n_s} \quad (6)$$

$$i = \frac{10000}{4000} = 2,5$$

Kontrola maximálního snímaného momentu:

$$i = \frac{M_s}{M_m} \Rightarrow M_s = M_m \cdot i \quad (7)$$

$$M_s = 1,64 \cdot 2,5 = 4,1 \text{ Nm}$$

Maximální zatížení točivým momentem zpřevodované větve, ve které je zapojen snímač, je 4,1 Nm, což je hodnota, kterou snímač zvládá měřit.

Volba převodu:

Pro zpřevodování je použito pohonu ozubeným řemenem od firmy Haberkorn Ulmer. Převod se skládá ze dvou řemenic, řemenu a vypínací kladky. Pro zatížení, které řemen přenáší, je použit polyuretanový řemen typu Synchro-Power s profilem zubu AT5, šířkou řemene 25 mm a délkou 280 mm. Řemenice z hliníkové slitiny jsou s hřídelí spojeny pery a polohu zajišťují pojistné kroužky. Malá řemenice má počet zubů 16, velká řemenice má 40 zubů. Pro zvolené rozměry vychází osová vzdálenost hnacího a hnaného hřídele 67 mm. Pro dopnutí řemene slouží vypínací kladka s průměrem 30 mm.

3.3 Princip měření

PLC řídicí systém brzdového stanoviště je vybaven sériovým rozhraním RS232 pro připojení k PC s řídicím programem. V programu zadáváme požadované otáčky. Pomocí ručního nastavení škrtkovací klapky spalovací motor na těchto otáčkách ustálíme. V tuto chvíli by motor neměl být nijak zatížen. Čerpadlo přečerpává hydraulický olej, kterému není kladen žádný odpor. Proporcionální ventil je plně otevřen a hydraulický olej může volně protékat. Do příslušného souboru se ukládají hodnoty točivého momentu, polohy škrtkovací klapky a otáček motoru. Tedy pro požadované otáčky při nulovém zatížení je potřeba dané otevření klapky. Poté začneme škrtkovací klapku otvírat na zvolenou hodnotu, pro kterou chceme znát měřené veličiny výkonu a točivého momentu. Tato hodnota bude graficky zobrazována na monitoru řídicího PC, aby bylo možné ji nastavit. Otvíráním škrtkovací klapky spalovacího motoru má motor tendenci zvýšit své otáčky a tím zubové čerpadlo začne generovat vyšší průtok hydraulického oleje. Změnu otáček zaznamená snímač otáček, který tuto informaci předá řídicímu programu. Program na tuto situaci reaguje tím, že zvýšené otáčky vrátí na původně zadanou hodnotu, a to tak, že zvýšený průtok hydraulického oleje začne regulovat pomocí proporcionálního rozvaděče na původní hodnotu. Díky tomu se otáčky spalovacího motoru vrátí na původní zadanou hodnotu. Při zachování stejného průtoku hydraulického oleje se však zvýší jeho tlak v části mezi zubovým čerpadlem a proporcionálním ventilem. Po ustálení stavu se opět manuálně uloží okamžité měřené

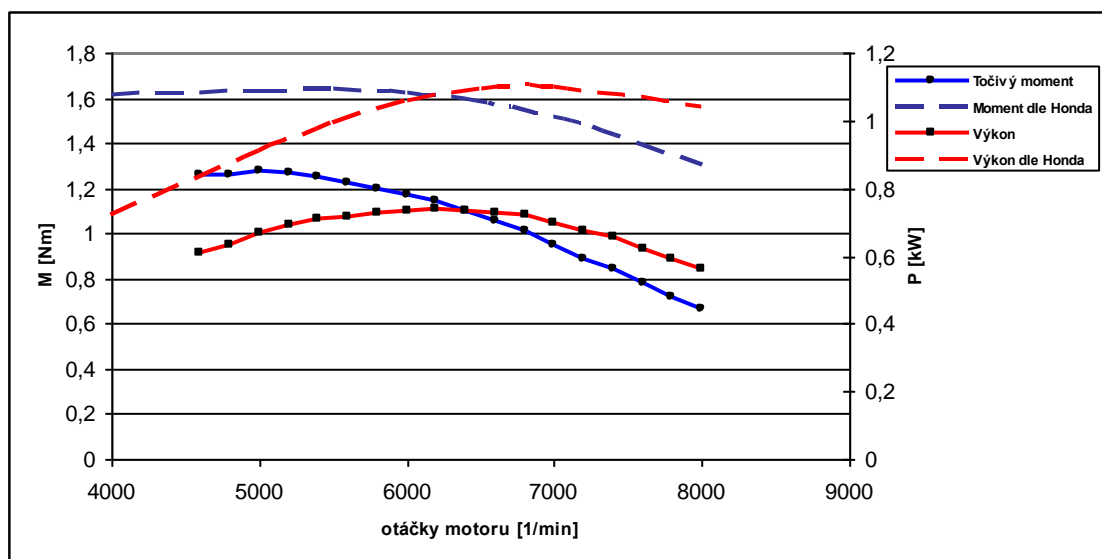
hodnoty, tedy pro dané konstantní otáčky a zvolenou polohu škrťací klapky naměřený točivý moment. Takto pokračujeme v konstantních otáčkách pro celý rozsah škrťací klapky a naměřené veličiny ukládáme do řídicího programu. Tento postup opakujeme pro libovolné otáčky spalovacího motoru, čili pro celý rozsah otáček spalovacího motoru. Z naměřených veličin ukládaných do řídicího programu lze nechat vykreslit grafy výkonu a točivého momentu v závislosti na otáčkách při různých polohách otevření škrťací klapky.

4 PROVOZNÍ ZKOUŠKY

Postup provozních zkoušek je popsán v kapitole 3.3.

4.1 Spalování benzínu

Nejprve byla provedena měření s použitím benzínu. Z příslušných měření jsem získal data potřebná ke grafickému znázornění vnější otáčkové charakteristiky, viz. *Obrázek 6*. Tyto hodnoty jsem porovnal s hodnotami, které udává výrobce.



Obrázek 6: Vnější otáčková charakteristika

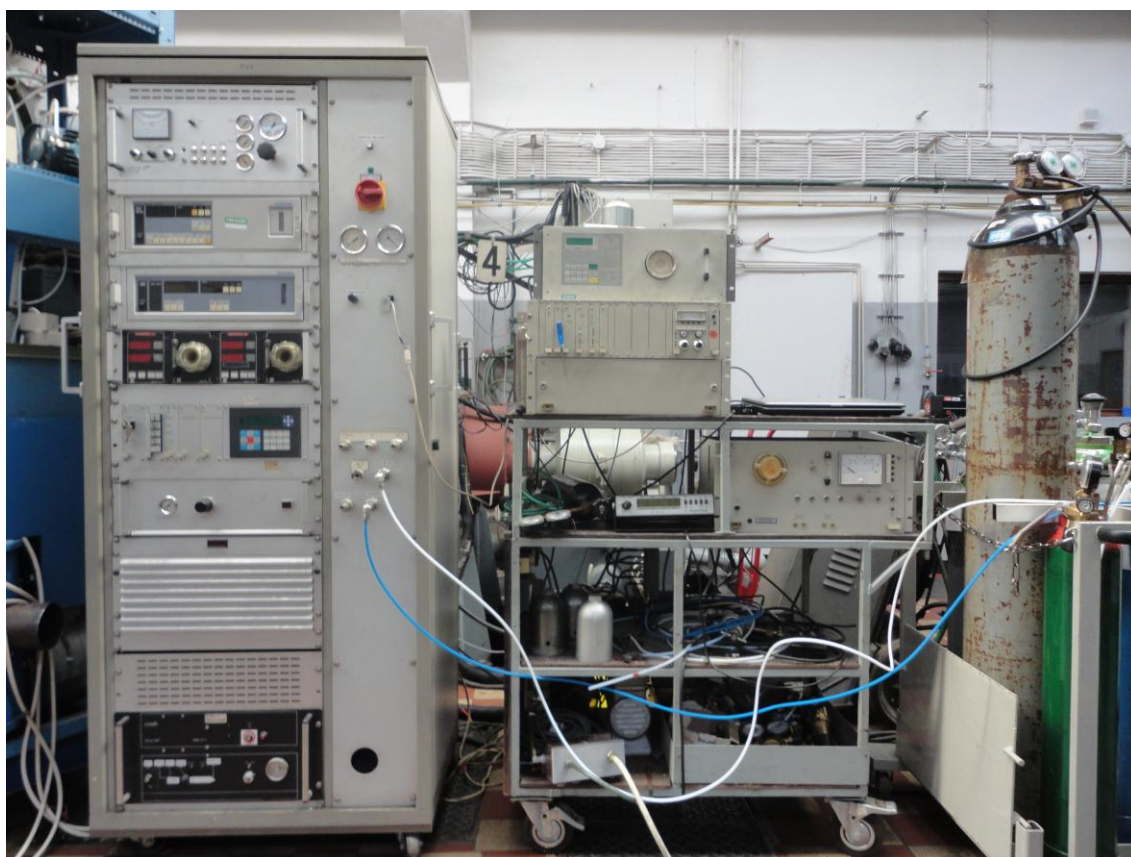
Během měření se projevilo několik nedostatků příslušného stanoviště. Jak je patrné z grafu, křivky naměřené a křivky udané výrobcem se od sebe tvarově prakticky neliší, liší se však v hodnotách, kde hodnoty naměřeného točivého momentu jsou zhruba o 0,35 Nm nižší, což se projevuje i u křivky výkonu. Toto ponížení hodnot je způsobeno tím, že motor musí překonávat nezanedbatelné pasivní odpory, které mu klade poháněná soustava, jmenovitě: odstředivá spojka, pružná hřídelová spojka, převodovka s řemenovým převodem, valivá ložiska apod. Tyto pasivní odpory byly patrné i při protočení rukou po demontáži motoru.

Jako dalším nedostatkem může být nevhodně zvolený snímač momentu, který má maximální možný měřený moment 54 Nm, což je při maximálním možném zpřevodovaném točivém momentu dosaženém motorem 4,1 Nm zhruba 8 % rozsahu snímače. I přes odchylku měřeného a skutečného točivého momentu lze dosáhnout

opakovatelného nastavení hydrogenerátoru a zjistit změny vyšetřovaných veličin za stejných podmínek.

4.2 Spalování butanolu

Na základě hodnot získaných z vnější otáčkové charakteristiky, viz. kap. 4.1., byla provedena měření, ze kterých byla získána data potřebná pro zpracování zatěžovací charakteristiky různých paliv při jednotlivých provozních režimech. Do výfukového potrubí byla také umístěna odběrová sonda analyzátorů spalín.



Obrázek 7: Analyzátor spalín

4.2.1 Směs butanol – benzín různých koncentrací

Nejprve bylo provedeno měření s benzínem bez jakékoliv příměsi butanolu. Postupně byla koncentrace butanolu v benzínu zvyšována přes Bu15, Bu30, Bu50 a Bu85 až po Bu100, tedy čistý butanol bez příměsi benzínu. Směsi butanol-benzínových paliv byly stejně jako ethanol-benzínové (např. E85) míchány objemově, číslo v označení směsi tedy znamená procentuální objem alkoholu ve směsi.

Měření byla provedena v rozmezí 5000-8000 min⁻¹ při zatížení 25 %, 50 %, 75 % a 100 %.

Hodnoty emisí pro jednotlivá paliva byly porovnány pro každý provozní režim zvlášť. Výsledná data z těchto měření jsou zpracována a zobrazena v *Příloha č. 2*. Z grafů je patrné, že ve všech režimech se zvyšující se koncentrací dochází k výraznému snížení hodnot CO a uhlovodíků, bohužel ale dochází také ke zvýšené tvorbě nežádoucích oxidů dusíku (NO_x) z atmosférického dusíku a kyslíku. Emise NO_x jsou zvláště nebezpečné v kombinaci s uhlovodíky a proto normy stanovující limitní hodnoty posuzují a hodnotí jejich součet. Ve všech posuzovaných provozních režimech se součet těchto dvou emisních hodnot se zvyšující se hodnotou koncentrace butanolu snižoval.

4.2.2 Spotřeba paliva

Pro tvorbu směsi a její následné spalování je důležitým ukazatelem součinitel přebytku vzduchu, který přímo ukazuje odchylky směsi od směsi stechiometrické.

$$\lambda = \frac{m_L}{L_t \cdot m_p} = \frac{V_L}{L_{tM} \cdot V_p} \quad (8)$$

Pro $\lambda < 1$ předem připravené homogenní směsi, tedy tzv. bohaté směsi za nedostatku vzduchu vznikají produkty nedokonalého spalování, většinou zdraví škodlivé. Mírně bohaté směsi $\lambda \approx 0,9$ mají ovšem výhodnou nejvyšší rychlost šíření plamene. Pro $\lambda > 1$, tzv. chudé směsi, je možné při malém ochuzení ($\lambda \approx 1,1$) dosáhnout téměř dokonalého spalování, ale za vysokých teplot dochází ke vzniku jedovatých oxidů dusíku z atmosférického dusíku a kyslíku.

U motorů s připravenou směsí záleží na druhu paliva a s tím související výhřevnosti paliva a hlavně na způsobu a energii zážehu. Používá se buď stechiometrická směs $\lambda = 1$ nebo směs chudá, s ohledem na tvorbu oxidů dusíku $\lambda > 1,3-1,5$. Čím je výhřevnost paliva, energie zdroje zážehu a tlak i teplota vyšší, tím chudší směs je možné zažehnout (např. u zemního plynu je možné zažehnout směs s $\lambda \approx 1,9$). Při spalování heterogenní tvořící se směsi je vždy sumární přebytek vzduchu $\lambda > 1$ (počítáno z celkové dávky paliva a množství vzduchu. Nepříměřeně malý přebytek vzduchu při použití uhlíkových paliv vede k nedohoření sazí vytvořených během přípravy směsi, kdy se ohřívá a teplotně rozkládá palivo bez přítomnosti kyslíku.

Nejčastěji používané palivo Natural 95 (dříve označovaný jako Super 96) je složen z 85-85,5 % C a 14,5-15 % H.

Teoretická spotřeba kyslíku O_t k úplnému spálení kyslíku

$$O_t = \frac{1}{100} \cdot \left(\frac{8}{3}c + 8h + s - o \right) [\text{kg } O_2 / \text{kg paliva}], \quad (9)$$

kde c, h, s, o značí procentuální podíly hlavních složek paliva, tedy na základě (9):

$$O_t = \frac{1}{100} \cdot \left(\frac{8}{3} \cdot 85,5 + 8 \cdot 14,5 + 0 - 0 \right) = 3,44 \text{ kg } O_2 / \text{kg paliva}.$$

Je-li O_t teoretická spotřeba O_2 [kg], je pro spálení 1 kg paliva potřeba teoretické množství vzduchu L_t [kg]

$$L_t = \frac{O_t}{0,232} = \frac{3,44}{0,232} = 14,8 \text{ kg vzduchu / kg paliva} \quad (10)$$

Pro dosažení stechiometrické směsi dosazením $\lambda = 1$ do stechiometrického vzorce součinitele přebytku vzduchu (8) dostaneme:

$$1 = \frac{m_L}{14,8 \cdot m_p} \rightarrow 14,8 = \frac{m_L}{m_p},$$

což znamená, že pro dosažení stechiometrické směsi na 1 kg paliva připadá 14,8 kg vzduchu.

Nejvíce používaným alkoholovým palivem je etanol (C_2H_5OH), který obsahuje 52 % C, 13 % H a 35 % O.

$$O_t = \frac{1}{100} \cdot \left(\frac{8}{3} \cdot 52 + 8 \cdot 13 + 0 - 35 \right) = 2,07\bar{6} \text{ kg } O_2 / \text{kg paliva}$$

$$L_t = \frac{O_t}{0,232} = \frac{2,07\bar{6}}{0,232} = 8,95 \text{ kg vzduchu / kg paliva}$$

Po dosazení $\lambda = 1$ dostaneme: $\frac{m_L}{m_p} = 8,95$.

Pro zachování stechiometrické směsi je na 1 kg etanolu potřeba 8,95 kg vzduchu, tzn. že na tvorbu směsi o hmotnosti 15,8 kg (14,8 kg vzduchu + 1 kg benzínu) je třeba 1,58 kg ethanolu a 14,22 kg vzduchu, což znamená nárůst o 58 % hmotnosti paliva, tj. objemově 1,35 dm³ benzínu oproti 2,0 dm³ etanolu (hustota: $\rho_{\text{benzín}} = 740 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, $\rho_{\text{etanol}} = 789 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$), což je nárůst o 48 %.

Čistý ethanol, který neobsahuje žádné další příměsi, se však běžně neprodává, ale je dostupný jako E85, tedy 85 % ethanolu + 15 % benzínu.

$$O_t = \frac{1}{100} \cdot \left(\frac{8}{3} \cdot (52 \cdot 0,85 + 85,5 \cdot 0,15) + 8 \cdot (13 \cdot 0,85 + 14,5 \cdot 0,15) + 0 - 35 \cdot 0,85 \right) =$$

$$= 2,281 \text{ kg O}_2 / \text{kg paliva}$$

$$L_t = \frac{O_t}{0,232} = \frac{2,281}{0,232} = 9,833 \text{ kg vzduchu / kg paliva}$$

Po dosazení $\lambda = 1$ dostaneme: $\frac{m_L}{m_p} = 9,833$.

Pro zachování stechiometrické směsi je na 1 kg směsi E85 potřeba 9,833 kg vzduchu, tzn. že na tvorbu směsi o hmotnosti 15,8 kg (14,8 kg vzduchu + 1 kg benzínu) je třeba 1,46 kg E85 a 14,34 kg vzduchu, což je hmotnostní nárůst o 46 %, tj. objemově 1,35 dm³ benzínu oproti 1,87 dm³ E85 ($\rho_{E85} = 782 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$), což je nárůst o 38,5 %.

Jak můžeme vidět z těchto výpočtů, teoretický nárůst spotřeby ethanolu je oproti benzínu při zachování stechiometrické směsi značný. U směsi E85 se dá díky přítomnosti benzínu předpokládat menší nárůst spotřeby oproti čistému ethanolu, což se potvrdilo výpočty.

Tato práce se zabývá použitím butanolu (C₄H₉OH). Ten se skládá z 64,8 % C, 13,6 % H a 21,6 % O.

$$O_t = \frac{1}{100} \cdot \left(\frac{8}{3} \cdot 64,8 + 8 \cdot 13,6 + 0 - 21,6 \right) = 2,6 \text{ kg O}_2 / \text{kg paliva}$$

$$L_t = \frac{O_t}{0,232} = \frac{2,6}{0,232} = 11,21 \text{ kg vzduchu / kg paliva}$$

pro $\lambda = 1$: $\frac{m_L}{m_p} = 11,21$.

Na 1 kg paliva tedy připadá 11,21 kg vzduchu. Při srovnávací hmotnosti směsi 15,8 kg je poměr 1,294 kg butanolu a 14,506 kg vzduchu, tj. oproti benzínu nárůst o 29,4 %, což odpovídá 1,59 dm³ butanolu ve srovnání s 1,35 dm³ benzínu, tzn. navýšení o 17,75 % ($\rho_{\text{butanol}} = 814 \text{ kg/m}^3$).

Stejným způsobem byla vypočítána teoretická spotřeba i pro ostatní paliva, viz. *Tabulka 5*.

Tabulka 5: Srovnání teoretické spotřeby paliva

palivo	hmotnost paliva ve stech. směsi [kg]	nárůst hmotnosti [%]	nárůst objemu [%]
benzín	1	0	0
Bu15	1,034	3,4	1,98
Bu30	1,072	7,2	4,18
Bu50	1,127	12,7	7,44
Bu85	1,239	23,9	14,31
Bu100	1,294	29,4	17,75
E85	1,46	46	38,5
E100	1,58	58	48

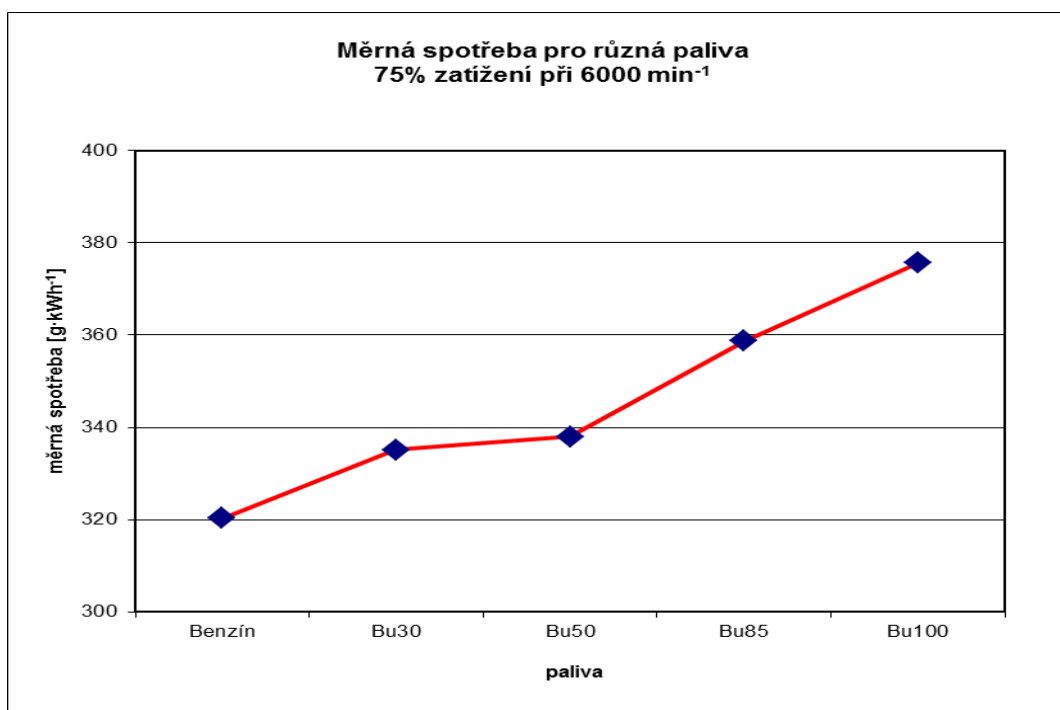
Při srovnání teoretické spotřeby výše uvedených paliv se jako nejhorší palivo jeví čistý ethanol. O něco menší spotřeba se dá očekávat u směsi E85. O více než polovinu vychází lépe spotřeba při spalování čistého butanolu. Při spalování směsi butanolu s benzínem se spotřeba ještě více sníží a např. pro Bu50 je nárůst spotřeby pouhých 7,44 %.

Při jednotlivých měřeních bylo do palivové nádrže vždy naléváno přibližně stejné množství. Po skončení měření v nádrži zůstávalo paliva zhruba stejně a nebyl pozorován žádný významný nárůst spotřeby. Tento odhad však je dosti nepřesný, protože každé měření neprobíhalo stejně a trvalo jinak dlouhou dobu. Bylo proto nutné provést měření, která by byla co nejvíce identická, a změřit spotřebu jednotlivých směsí. Vzhledem k malým rozměrům motoru, karburátoru a palivového vedení nebylo možné použít zařízení k měření průtoku. V úvahu přicházela varianta hmotnostního měření spotřeby paliva, u které také odpadlo měření množství paliva, které se vrátí z karburátoru zpět do nádrže. Palivová nádrž tedy byla demontována a postavena na váhu, která zaznamenávala hmotnost paliva po celou dobu měření, viz. *Obrázek 8*.



Obrázek 8: Měření spotřeby paliva

Pro srovnávací měření spotřeby paliv jsem zvolil jeden z režimů, při kterých se motor choval bezproblémově a nejevil žádné známky nestability, a to 75% zatížení motoru při 6000 min^{-1} . Získaným datům odpovídá následující graf.



Obrázek 9: Měrná spotřeba pro různá paliva

Z grafu je patrné, že oproti referenčnímu palivu, kterým je čistý benzín, dochází se zvyšující se koncentrací butanolu ve směsi k navýšení měrné spotřeby paliva, což odpovídá teoretickým výpočtům. Údaje o měrné spotřebě jednotlivých paliv a jejich srovnání s referenčním palivem jsou vyjádřeny v následující tabulce.

Tabulka 6: Srovnání měrné spotřeby pro různá paliva

Palivo	Měrná spotřeba paliva [g·kWh ⁻¹]	nárůst hmotnosti [%]	nárůst objemu [%]
Benzín	320	0	0
Bu30	335	4,615	1,409
Bu50	338	5,516	0,485
Bu85	359	11,973	3,21
Bu100	376	17,239	8,062

Při provedeném měření se podařilo ověřit zvýšení měrné spotřeby u butanol-benzínových směsí oproti benzínu. Naměřený nárůst spotřeby paliva nebyl tak vysoký jako teoretický nárůst spotřeby vypočítaný, viz. *Tabulka 5*. Teoretické výpočty byly provedeny pro stechiometrické směsi a při měření motor zřejmě pracoval s menším množstvím paliva ve směsi.

Při jednotlivých měřeních bylo zaznamenáváno otevření škrtící klapky, čemuž odpovídá *Příloha č. 1*. Z těchto grafů je patrné, že při spalování butanolu u většiny režimů dochází k většímu otevření škrtící klapky, což vede k nárůstu spotřeby. Takto se kompenzuje nižší energetická hodnota butanolové palivové směsi dodaná motoru.

4.2.3 Provoz motoru za nízkých teplot

Jak je uvedeno v Kapitole 3.1, motor Honda GX 31 má široké využití. Většinou se jedná podobně jako třeba u rotačních sekaček o použití pouze v sezoně od jara do podzimu, tedy v období, kdy teploty neklesají pod bod mrazu. Nicméně křovinořezy, fukary, čerpadla a elektrocentrály, které jsou také poháněny motorem GX 31, mohou být občas použity i v teplotách pod 0 °C. V příručce k tomuto motoru [6] výrobce uvádí doporučené teploty okolí v rozsahu -5 °C až + 40 °C. Bylo tedy potřeba provést zkoušky za nízkých teplot.

Experiment proběhl následovně: motor byl demontován ze stanoviště, doplněn palivem a 60 minut vystaven teplotě okolí -14 °C. Poté byla vyzkoušena startovatelnost. Po 30 minutách se start opakoval. Následně bylo palivo vyměněno za směs s vyšší

koncentrací butanolu, palivové vedení a karburátor propláchnuty novou směsí a postup se opakoval.

Prvním testovaným palivem byl benzín bez příměsí butanolu. Projevila se o trochu horší startovatelnost oproti zkouškám v laboratořích KVM, ale oba starty byly úspěšné.

Druhým palivem byl benzín s příměsí 15 % butanolu. Směs neprojevovala zhoršené chování ve srovnání s benzínem a oba starty proběhly úspěšně.

Třetím palivem byl Bu30. K nastartování bylo potřeba více než 20 tahů startéru. Druhý start se nepovedl.

U směsi benzín-butanol v poměru 1:1 ani po několikanásobných pokusech k nastartování nedošlo.

-

Další experimentální zkoušky byly provedeny při teplotě okolí 10 °C. Starty byly úspěšné až do 50% koncentrace butanolu. Pro Bu85 se start nepodařil ani při několikanásobných pokusech. Po přemístění motoru do laboratoří KVM, kde teplota vzduchu byla 20 °C a montáži zpět na stanoviště byly starty bezproblémové v celém rozsahu koncentrací butanolu.

Pro zkoušky startovatelnosti při teplotě 0 °C jsem použil také čtyřtákní motor Briggs & Stratton o výkonu 4,4 kW, kterým je poháněna zahradní sekačka. Motor byl bez jakýchkoliv úprav. Postup zkoušky byl stejný jako u motoru Honda. Startovatelnost pro benzín a Bu15 byla ověřena i při nižších teplotách, proto jsem provedl zkoušku až pro Bu30. Oba starty byly úspěšné. Při směsi Bu50 však nastaly komplikace

4.2.4 Zhodnocení a navržení změn

Z naměřených a vypočtených hodnot (*Obrázek 9* a *Tabulka 5*) vyplývá, že při spalování butanolu dochází k navýšení spotřeby paliva. Čím je koncentrace butanolu v palivu vyšší, tím vyšší je i jeho spotřeba. To je způsobeno nižší výhřevností alkoholových paliv ve srovnání s benzínem. Pro nižší koncentrace butanolu by motor mohl být provozován beze změn. Při vyšších koncentracích butanolu motor občas vykazoval nestabilní chování, což bylo způsobeno omezeným množstvím paliva, které dokáže karburátor dodat motoru. Pro optimální chod motoru a jeho plné využití

lze toto vyřešit zvýšením dávky paliva – úprava karburátoru (větší průměr trysky), popř. nastavení řídicí jednotky.

Další nevýhodou může být použití palivových směsí s vyšším obsahem butanolu za nižších teplot. Při teplotách pod bodem mrazu se projevila špatná startovatelnost směsí Bu30 a vyšších. Při teplotách 18 °C a vyšších bylo možné motor nastartovat bez problémů až do Bu100. Při použití motoru za nízkých teplot bych tedy volil směs s nižším obsahem butanolu nebo motor nejprve nastartovat a zahřát na benzín a poté náplň nádrže vyměnit za palivo s vyšším obsahem butanolu. Další možností by byla montáž přídavné nádrže s benzínem a kohout, který by umožnil přepnutí přívodu mezi dvěma nádržemi. Při startu by kohout byl přepnut na přídavnou nádrž s benzínem. Po zahřátí motoru by byl kohout přepnut na hlavní palivovou nádrž se směsí s vyšším obsahem butanolu. Další možností je použití elektrické ohřívací jednotky paliva, tzv. předeřevu, která se používá třeba u dieselových motorů spalujících MEŘO. Tento způsob řešení je vhodný pro větší motory, které disponují vhodným zdrojem energie pro ohřev paliva.

5 KOMPATIBILITA BUTANOLU S OSTATNÍMI MATERIÁLY

Použitý motor a jeho příslušenství byly navrženy pro spalování benzínu. Různá paliva mají různé vlastnosti, a to jak fyzikální tak chemické. Alkoholová paliva mohou s materiály, se kterými přicházejí do styku, dost nepříznivě reagovat a často je nutné je nahradit materiály, ke kterým je alkohol inertní. Pro porovnání jsem použil tři paliv – benzínu, čistého butanolu a čistého ethanolu.

5.1 Dopravní vedení a nádrž

Místy, kde je palivo téměř nepřetržitě, jsou nádrž a palivové vedení. Palivová nádrž pro motor GX 31 a také většinu malých spalovacích motorů je vyrobena z HDPE, což je polyethylen vysoké hustoty. Z [7] a [8] vyplývá, že HDPE prokazuje lepší odolnost vůči butanolu a ethanolu ve srovnání s benzínem.

Palivové pryžové vedení je vyrobeno z měkkčeného PVC, označovaného jako novoplast. Ten vykazuje podobné vlastnosti jak ethanolu a butanolu, tak benzínu, a to průměrnou odolností materiálu vůči těmto médiím. Ta by měla být ve styku s materiálem jen po omezenou dobu, což má vliv na životnost výrobku.

Pro ověření jsem provedl experiment, při kterém jsem do každého z paliv ponořil trubičku z HDPE a hadičku z novoplastu po dobu 60 dní. U HDPE se neprojevily žádné změny a materiál si zachoval své původní vlastnosti. U hadiček z novoplastu se projevily rozdíly, viz. *Obrázek 10*, *Obrázek 11* a *Obrázek 12*, na kterých jsou hadičky zatíženy závažím o váze 1 kg.



Obrázek 10: Palivová hadička vystavená účinkům benzínu



Obrázek 11: Palivová hadička vystavená účinkům butanolu



Obrázek 12: Palivová hadička vystavená účinkům ethanolu

Zatímco u benzínu (*Obrázek 10*) si hadička zachovala původní vlastnosti a zůstala lehce stlačitelná, hadička v ethanolu (*Obrázek 12*) ztvrdla a stala se prakticky nestlačitelná. U butanolu (*Obrázek 11*) došlo k minimálním změnám a hadička při stlačení kladla jen o něco málo větší odpor než vzorek vystavený působení benzínu.

5.2 Spalovací motor

Bezvložkový válec motoru GX 31 je vyroben z hliníkové slitiny s vysokým obsahem křemíku. Písty, taktéž z hliníku, mají vysoce tvrdou povrchovou úpravu. Další součástí, která je ze slitiny hliníku, je karburátor. Pístní kroužky jsou vyrobeny z ušlechtilé oceli. Na základě [7] je zde uvedena tab. chemické odolnosti materiálů vůči palivům.

Tabulka 7: Chemická odolnost vybraných kovů vůči použitým palivům

Médium	Materiál	chemická odolnost
Benzín	Hliník	Střední odolnost (omezený styk s médiem)
	Mosaz	Střední odolnost
	Bronz	Střední odolnost
	Uhlíková ocel	Střední odolnost
	Nerez ocel	Střední odolnost
Ethanol	Hliník	Střední odolnost
	Mosaz	Střední odolnost
	Bronz	Střední odolnost
	Uhlíková ocel	Střední odolnost
	Nerez ocel	Střední odolnost
Butanol	Hliník	Vysoká odolnost
	Mosaz	Střední odolnost
	Bronz	Vysoká odolnost
	Uhlíková ocel	Vysoká odolnost
	Nerez ocel	Vysoká odolnost

Jak je možno vidět z tabulky, zde uvedené materiály mají přibližně stejnou chemickou odolnost u benzínu a u ethanolu. Větší chemická odolnost by měla být vůči butanolu. Toto bylo opět ověřeno experimentálně. Do sklenic s palivy byly vloženy plechy z ušlechtilé oceli a spodní část motocyklového karburátoru Honda z hliníkové slitiny EN AC 45300 (Al Si5 Cu1 Mn), která byla rozřezána na tři části. Ani u jednoho ocelového plechu se neprojevily změny, pouze na površích hliníkové slitiny vystavené působení benzínu (*Obrázek 13*) a ethanolu (*Obrázek 14*) se utvořila vrstva oxidu.



Obrázek 13: Hliníková slitina vystavená působení benzínu



Obrázek 14: Hliníková slitina vystavená působení ethanolu

U hliníkové slitiny vystavené působení butanolu zůstal povrch prakticky beze změn (Obrázek 15).



Obrázek 15: Hliníková slitina vystavená působení butanolu

5.3 Těsnící prvky

Neméně důležitou součástí jsou těsnící prvky. Asi nejběžnějšími těsněními palivového systému jsou kroužky kruhového průřezu z olejivzdorné pryže (NBR) a těsnění papírová. Materiál NBR se vyznačuje dobrou odolností ve styku s tuky a minerálními a živočišnými oleji za normálních teplot prostředí a dále také výbornou odolností vůči benzínu, butanolu a ethanolu. O-kroužky vystavené účinkům jednotlivých paliv neprojevily žádné změny a zachovaly si své vlastnosti.

6 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo teoretické a experimentální vyšetření možnosti provozu malého spalovacího motoru na alkoholová paliva a jejich směsi s benzínem v různých koncentracích. Problematika použití ethanolu byla v literatuře, dle mého názoru, řešena v obsáhlejší míře ve srovnání s butanolem a na základě studia literatury se butanol díky svým vlastnostem také zdál jako vhodnější náhrada benzínu. Pro tuto práci jsem tedy zvolil butanol.

Na základě provedených provozních zkoušek se ukázalo, že butanolu lze použít jako paliva pro spalovací motor určený původně pro spalování benzínu bez nutnosti výraznějších úprav. Pouze je pro vyšší koncentrace butanolu v palivové směsi v důsledku jeho nižší výhřevnosti potřeba vyřešit navýšení dávky paliva. To je typické pro alkoholová paliva. Navýšení není tak vysoké jako třeba u ethanolu, ale při vyšších koncentracích butanolu v palivové směsi se u motoru v určitých režimech může projevovat nestabilita způsobená nedostatečným množstvím paliva ve směsi se vzduchem při stejném nastavení karburátoru jako při spalování benzínu.

Karburátor, který byl na motoru použitým v této diplomové práci, bohužel neumožňuje úpravy, a proto nemohlo být toto ověřeno prakticky.

Z provedených měření vyplývá, že pro použití butanol-benzínových směsí je důležitým faktorem teplota, za které bude motor provozován. Pro nižší teploty okolí je motor obtížně startovatelný na palivo s vyšší koncentrací butanolu a je vhodnější použít směs s nižší koncentrací. Další možností je na ohřev motoru použít jiného paliva třeba čistého benzínu nebo směsi s menším obsahem butanolu a poté motor provozovat na palivo s vyšším obsahem.

Z dat získaných z analyzátoru výfukových spalin se ukázalo, že při spalování butanol-benzínových směsí dochází oproti benzínu ke snížení emisí CO a uhlovodíků. Pouze hodnoty emisí NO_x jsou u alkoholových směsí vyšší než u benzínu. To může souviset se zvýšenou teplotou při spalování, což indikuje zvýšená teplota výfukových plynů (viz. *Příloha č. 3*). Zvýšení teploty u butanol-benzínových směsí je způsobeno tím, že při spalování benzínu byla palivová směs mírně bohatá, zatímco u alkoholových se směs blížila ke směsi stechiometrické, což dokazuje snižování HC a CO a naopak nárůst NO_x . Při součtu emisí NO_x a uhlovodíků však dochází oproti benzínu ke snížení

hodnot se zvyšujícím se obsahem butanolu. Lze tedy říci, že butanol-benzínové směsi mají příznivý vliv na hodnoty emisí ve výfukových plynech.

I přes nevýhody spojené s komplikacemi se starty za snížených teplot se butanol jeví jako vhodnější palivo než dnes již běžně používaný ethanol, a to díky výrazně vyšší chemické energii dodané motoru ve směsi, což se projevuje na nižší spotřebě paliva ve srovnání s ethanolem a pak také díky nižší agresivitě vůči materiálům, se kterými přichází palivo do styku.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1]. HIRSCH, R. L., BEZDEK, R. H., WENDLING, R. M. *Peaking of world oil production : Impacts, mitigation & risk management* [online]. Washington, DC : United States Department of Energy (NETL), 2005 [cit. 2012-02-15]. Dostupný z URL: <http://www.netl.doe.gov/energy-analyses/pubs/Oil_Peaking_NETL.pdf>.
- [2]. British Petroleum: *Butanol as a Gasoline Blending Bio-component* [online]. 28.3.2007 [cit. 2012-02-10]. Dostupný z URL: <<http://www.epa.gov/air/caaac/mstrs/March2007/Wolf.pdf>>.
- [3]. VLK, F. *Paliva pro spalovací motory*. 1. vydání. Brno : Nakladatelství a vydavatelství Vlk, 2006. 376 s. ISBN 80-239-6461-5.
- [4]. TŘEBICKÝ, V. Vlastnosti paliv s obsahem biosložek [online]. Milovy: Approchem 2008.Odpadové forum 2008. 16.4.2008 [cit. 2012-3-10]. dostupný z URL: <http://www.petroleum.cz/upload/aprochem2008_ap_04.pdf>.
- [5]. Honda Motor Co, Ltd.: *Owners Manual Gx22-Gx31* [online]. 2003. [cit. 2012-02-15]. Dostupný z URL: <<http://engines.honda.com/parts-and-support/owners-manuals/gx31>>.
- [6]. MIKEŠ, M. Konstrukce malého brzdového stanoviště se spalovacím motorem Honda : bakalářská práce. Liberec : Technická univerzita, Fakulta strojní, 2011. 59 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Josef Blažek Ph.D.
- [7]. *Tabulka chemických vlastností* [online]. [cit. 2012-03-15]. Dostupný z URL: <<http://www.gumex.cz/html/tabulka-chemickych-vlastnosti.html>>.
- [8]. *Technické informace – tabulka chemických odolností pro materiály hadic* [online]. [cit. 2012-3-20]. Dostupný z URL: <<http://www.tubes-international.cz/pdf/inftech/1081-1088.pdf>>.

- [9]. AGARWAL, A.K. *Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines* [online]. 2006, poslední revize 27.11.2006.
[cit. 2012-02-10]. Dostupný z URL:
<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360128506000384>>.
- [10]. HEYWOOD, J.: *Internal Combustion Engine Fundamentals*. McGraw-Hill, 1998. ISBN 978-0070286375.
- [11]. KNOLL, K., et al. *Effects of Intermediate Ethanol Blends of Legacy Vehicles and Small Non-Road Engines* [online]. USA: National Renewable Energy Laboratory, 2009
[cit. 2012-02-10]. Dostupný z URL: <<http://www.nrel.gov/docs/fy09osti/43543.pdf>>.
- [12]. MATĚJOVSKÝ, V. *Automobilová paliva*. Grada, 2004. ISBN 80-247-0350-5.
- [13]. MARTYR, A.J., PLINT, M.A. *Engine Testing*. Butterworth-Heinemann, 2007. ISBN 978-0750684392.
- [14]. MUŽÍKOVÁ, Z., KÁŇA, J., POSPÍŠIL, M. *Fyzikálně-chemické vlastnosti butanol-benzínových směsí* [online]. Praha : VŠCHT, 2009 [cit. 2012-02-20]. Dostupný z URL: <http://www.petroileum.cz/upload/aprochem2009_204.pdf>.
- [15]. PATÁKOVÁ, P., et al. *Využití cukrovky pro výrobu biobutanolu* [online]. Praha : VŠCHT, 2011 [cit. 2012-02-20]. Dostupný z URL:
<http://www.cukr-listy.cz/on_line/2011/PDF/46-49.pdf>.
- [16]. POSPÍŠIL, M., ŠIŠKA, J., ŠEBOR, G. *Biobutanol jako pohonná hmota v dopravě* [online]. Praha : VŠCHT, 2007 [cit. 2012-02-20]. Dostupný z URL:
<<http://www.mze-vyzkum-infobanka.cz/DownloadFile/54088.aspx>>.
- [17]. RAMEY, D. *Production of Butyric Acid and Butanol from Biomass. Final Report* [online]. EEI, Environmental Energy Inc., 2004 [cit. 2012-02-21]. Dostupný z URL:
<<http://www.afdc.energy.gov/afdc/pdfs/843183.pdf>>.
- [18]. SZWAJA, S., NABER, J.D. Combustion of n-butanol in a spark-ignition IC engine. *Fuel*. 2010, vol. 89, no. 7, p. 1573-1582. ISSN 00162361.

[19]. VLK, F. *Alternativní pohony motorových vozidel*. 1. vydání. Brno : Nakladatelství a vydavatelství Vlk, 2004. 234 s. ISBN 80-239-1602-5.

[20]. Zákon č. 365/2005 Sb., o emisích ve výfukových plynech zážehových motorů.

[online]. c2012 [cit. 2012-02-25]. Dostupný z URL:

<<http://www.gov.cz/wps/portal/s.155/6966/s.155/701?b=365/2005>>.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Hubbertova křivka výtěžnosti ropy

[http://cs.wikipedia.org/wiki/Hubbertova_křivka]

Obrázek 2: Tlak par ethanol-benzínových směsí v závislosti na obsahu ethanolu [4]

Obrázek 3: Vliv obsahu ethanolu a butanolu ve směsi s benzínem (Normal 91 a Natural 95) na tlak par [2]

Obrázek 4: Motor Honda GX31

Obrázek 5: Brzdné pole hydrodynamické brzdy [6]

Obrázek 6: Vnější otáčková charakteristika

Obrázek 7: Analyzátor spalin

Obrázek 8: Měření spotřeby paliva

Obrázek 9: Měrná spotřeba pro různá paliva

Obrázek 10: Palivová hadička vystavená účinkům benzínu

Obrázek 11: Palivová hadička vystavená účinkům butanolu

Obrázek 12: Palivová hadička vystavená účinkům ethanolu

Obrázek 13: Hliníková slitina vystavená působení benzínu

Obrázek 14: Hliníková slitina vystavená působení ethanolu

Obrázek 15: Hliníková slitina vystavená působení butanolu

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Vlastnosti paliv [2], [3]

Tabulka 2: Specifikace spalovacího motoru HONDA [5]

Tabulka 3: Parametry čerpadla

Tabulka 4: Parametry proporcionálního rozvaděče

Tabulka 5: Srovnání teoretické spotřeby paliva

Tabulka 6: Srovnání měrné spotřeby pro různá paliva

Tabulka 7: Chemická odolnost vybraných kovů vůči použitým palivům

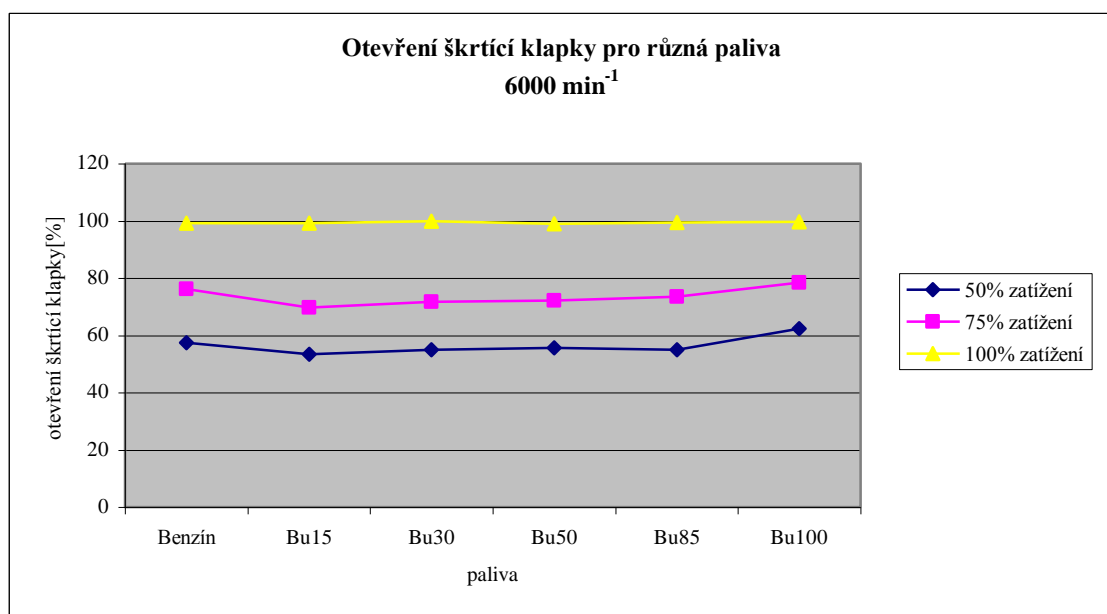
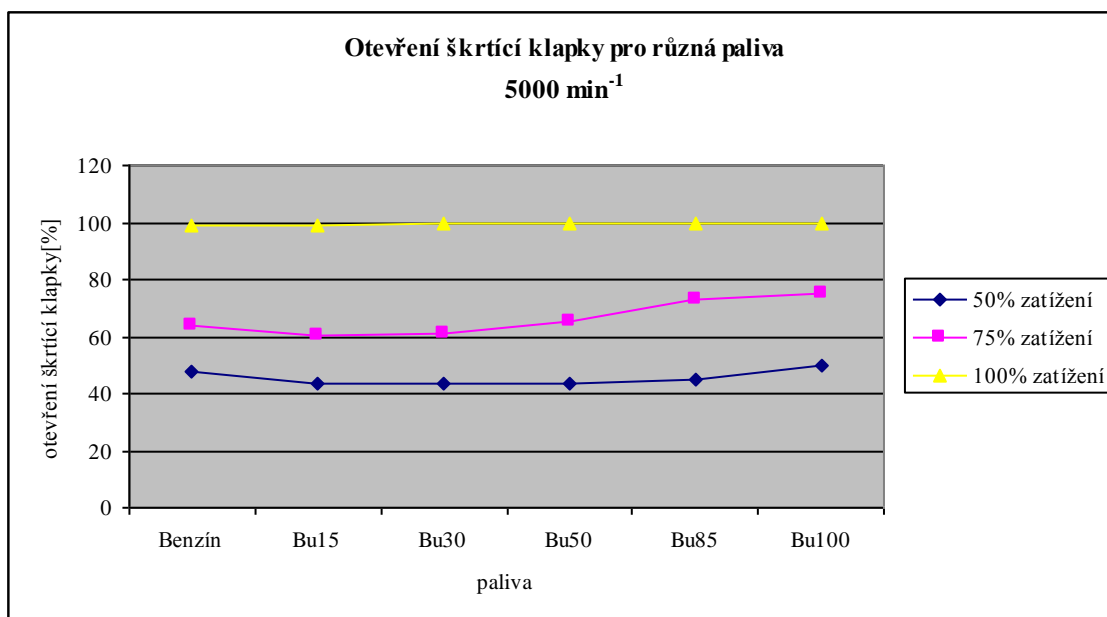
SEZNAM PŘÍLOH

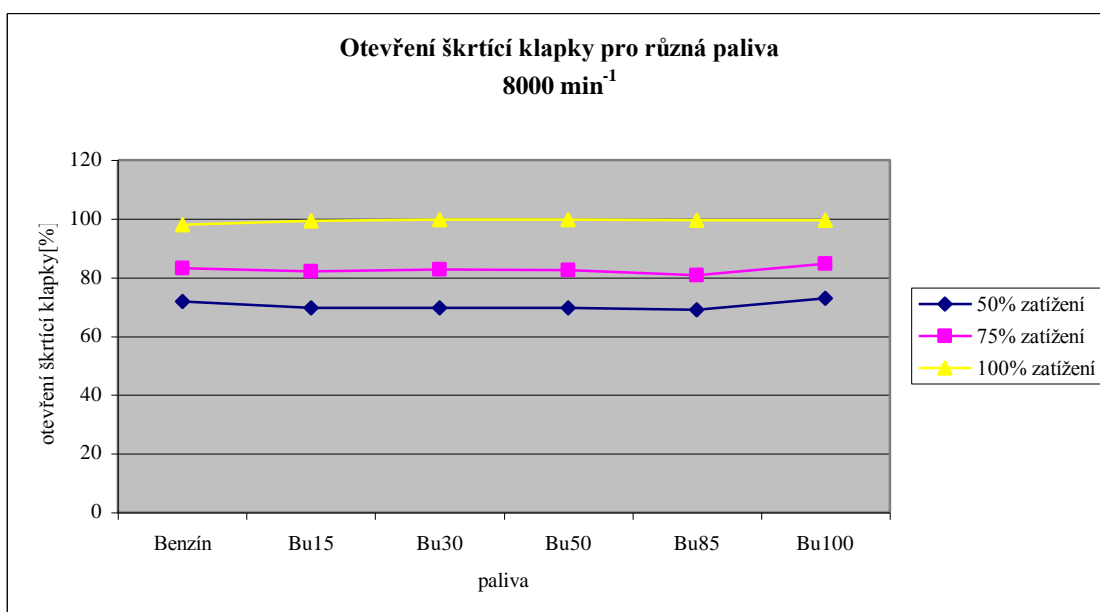
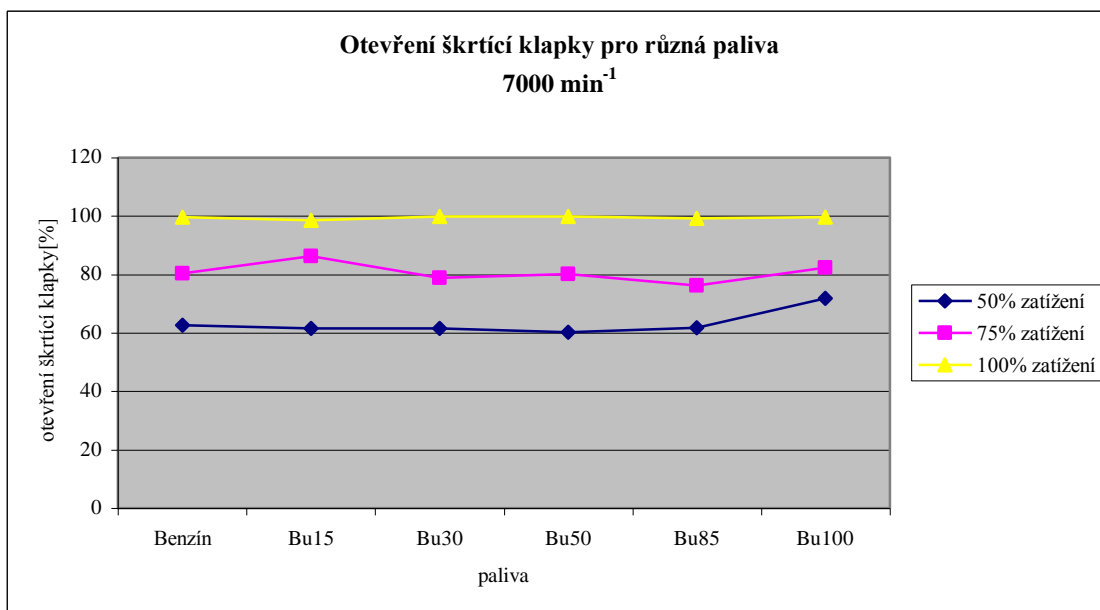
Příloha č. 1 – Otevření škrťací klapky

Příloha č. 2 – Srovnání emisí výfukových plynů

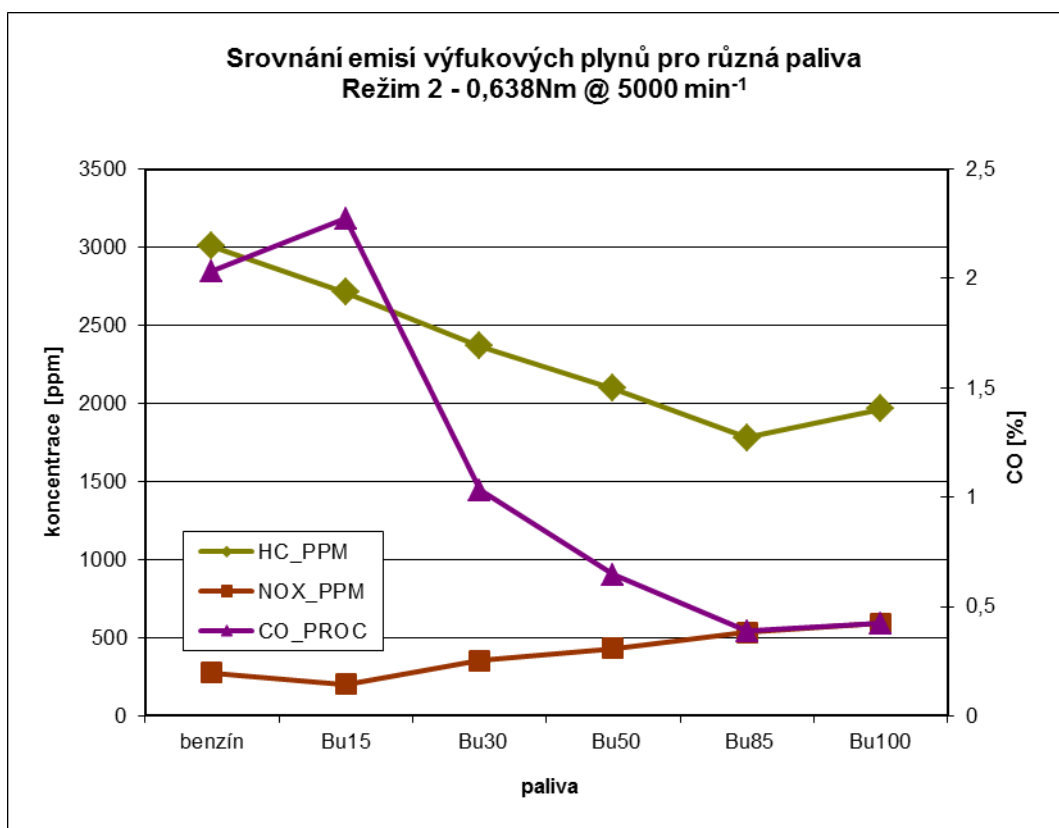
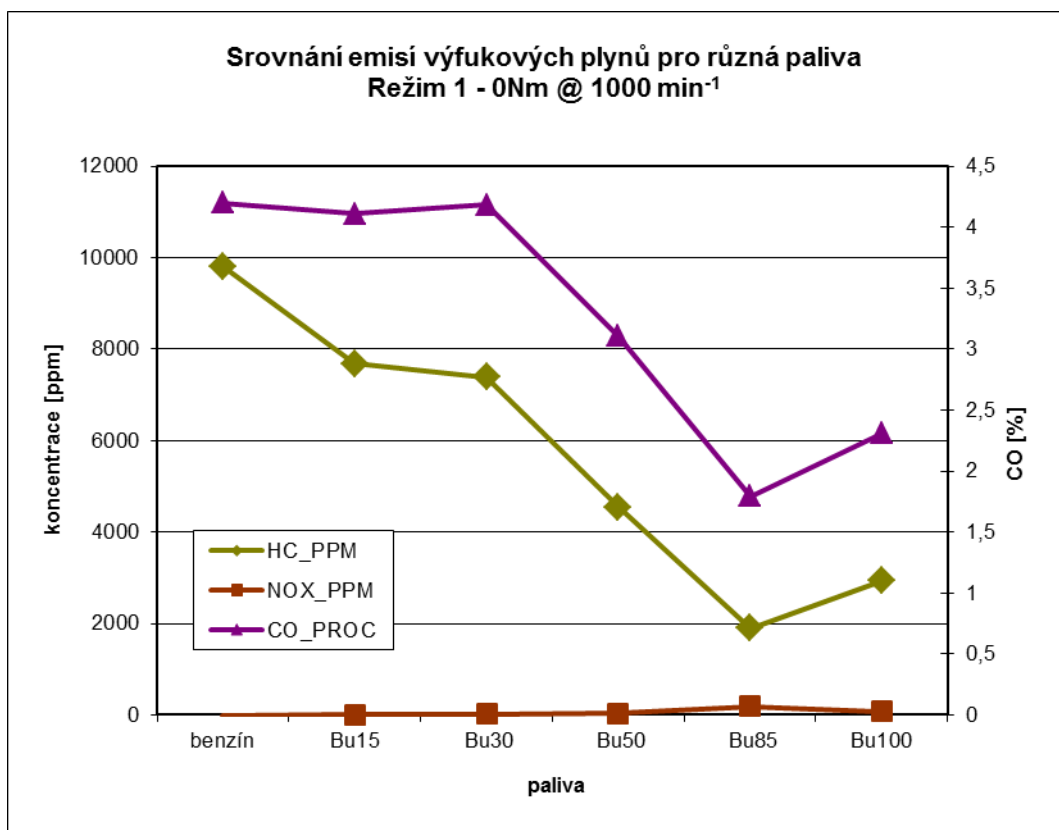
Příloha č. 3 – Teploty výfukových plynů

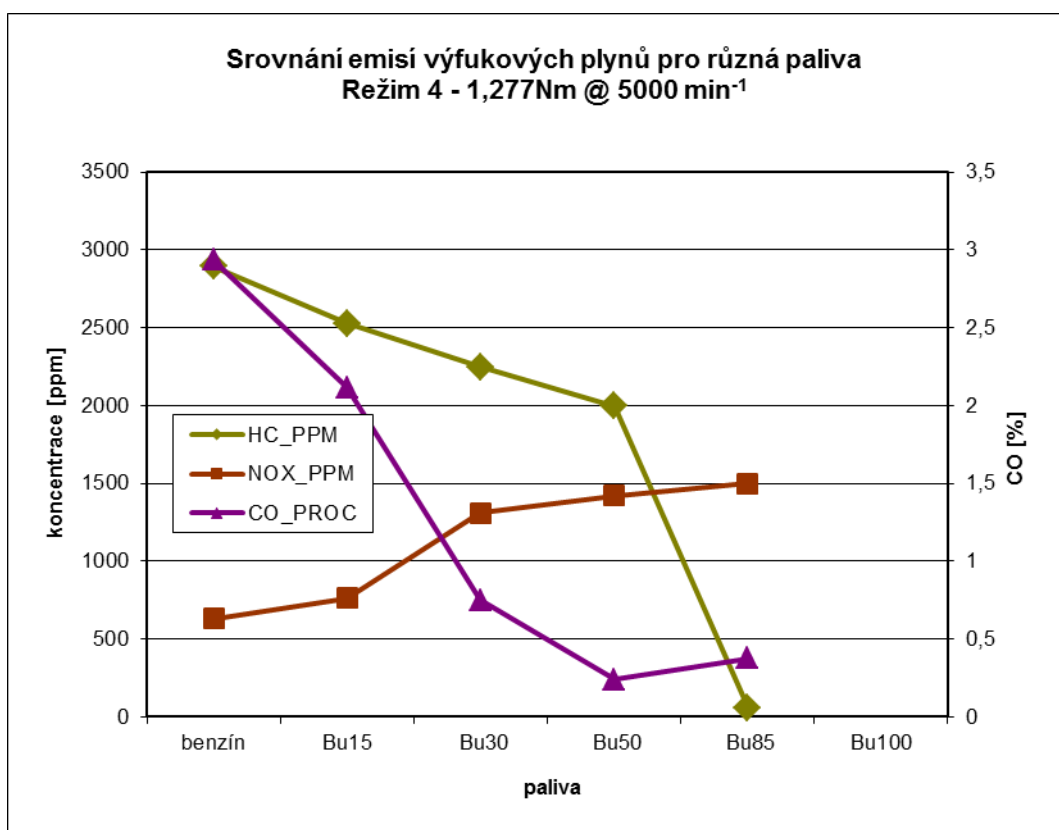
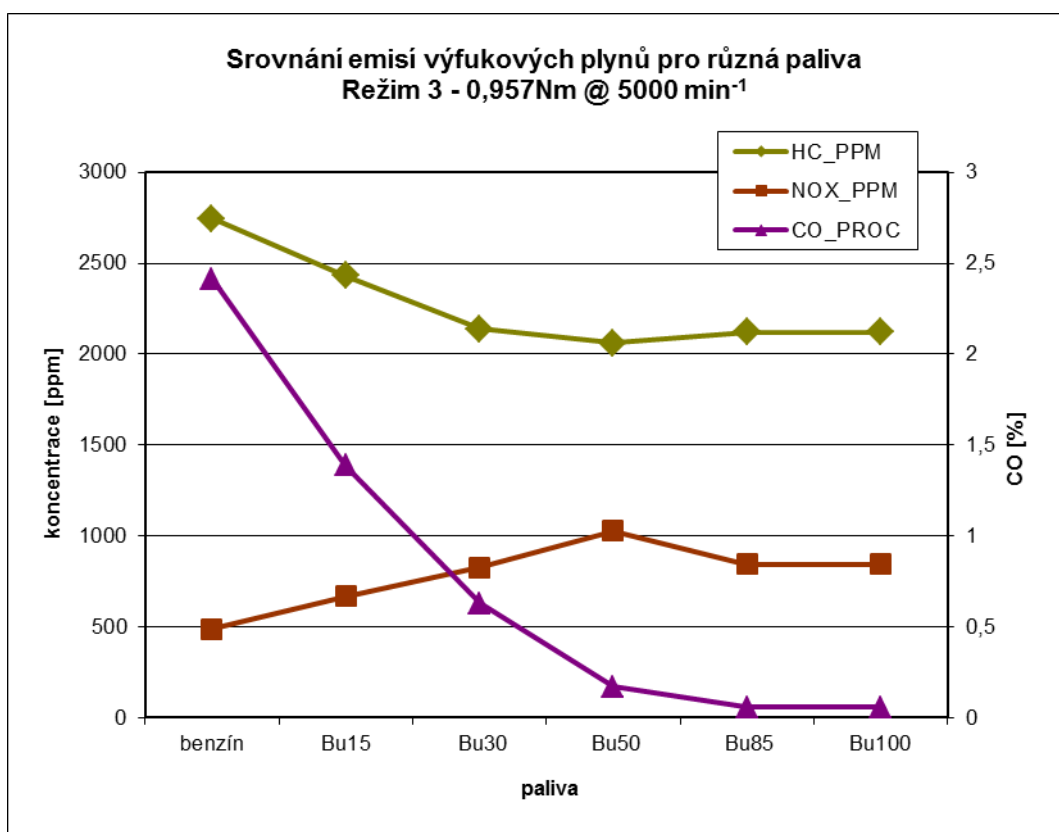
Příloha č. 1 – Otevření škrťací klapky

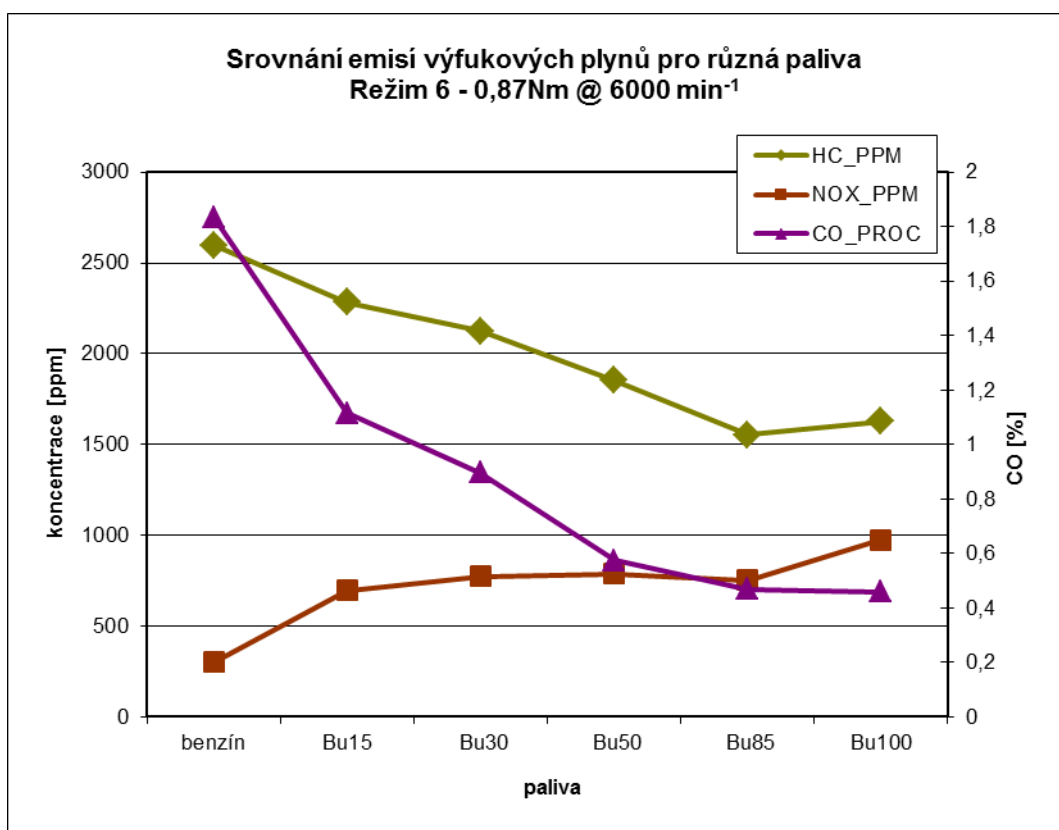
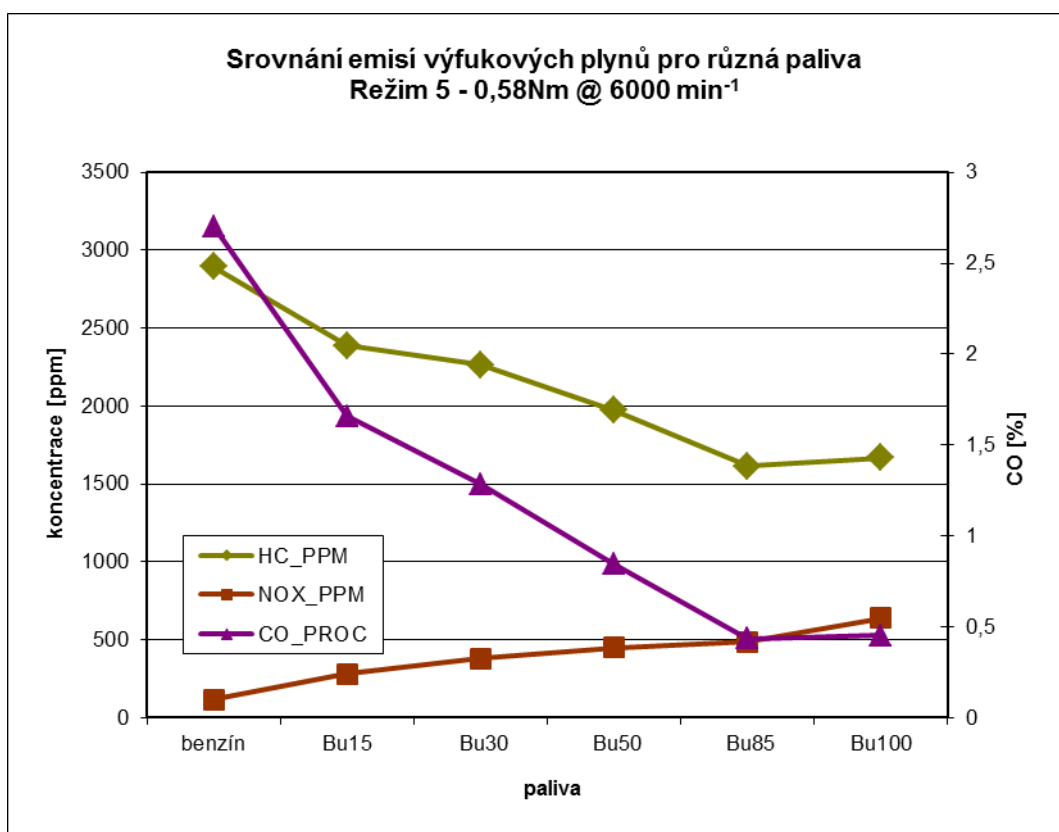


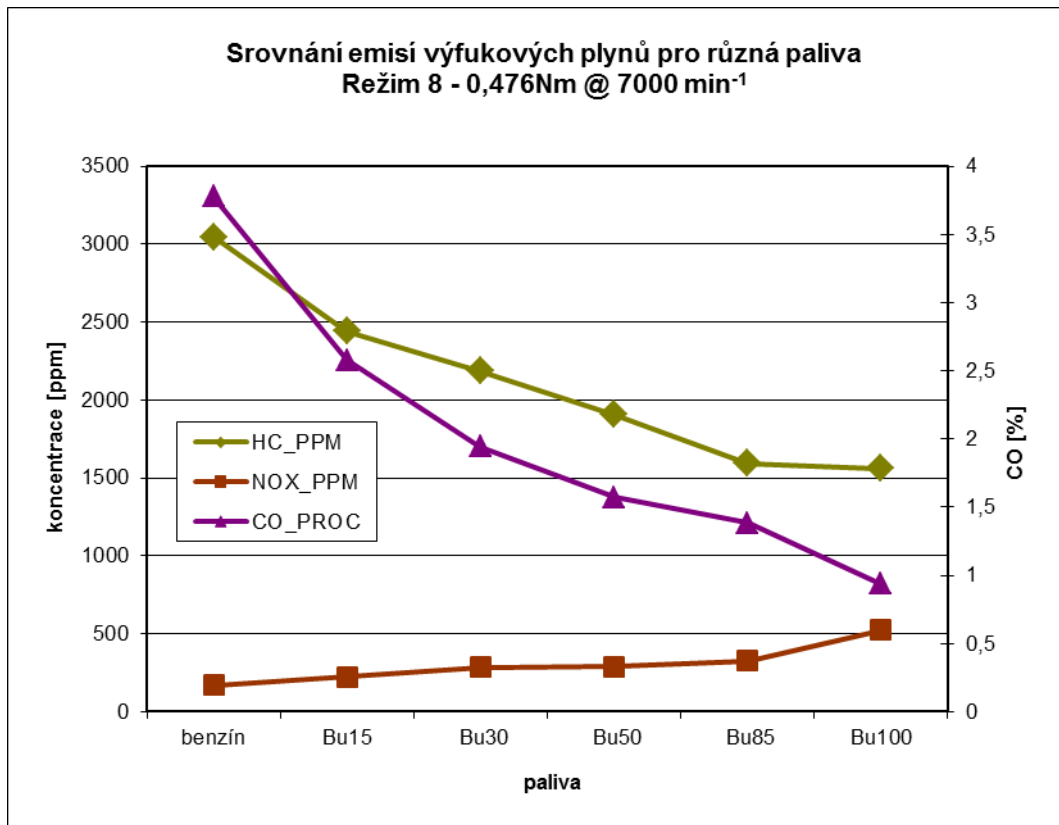
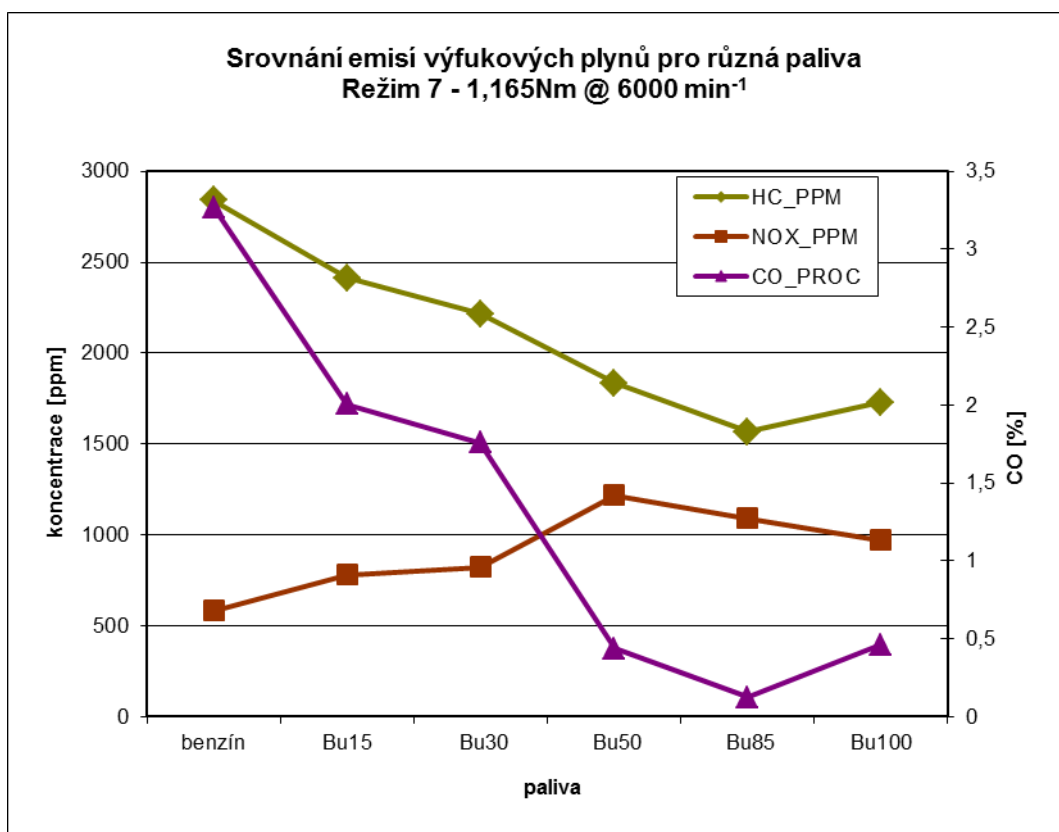


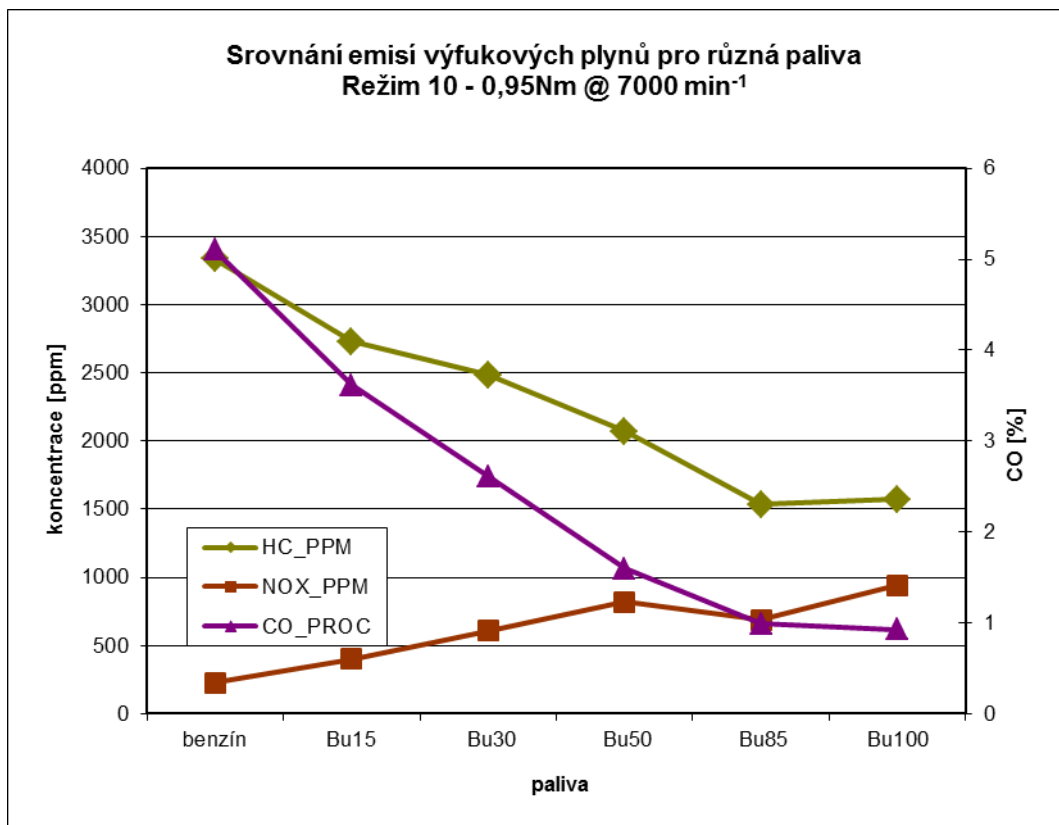
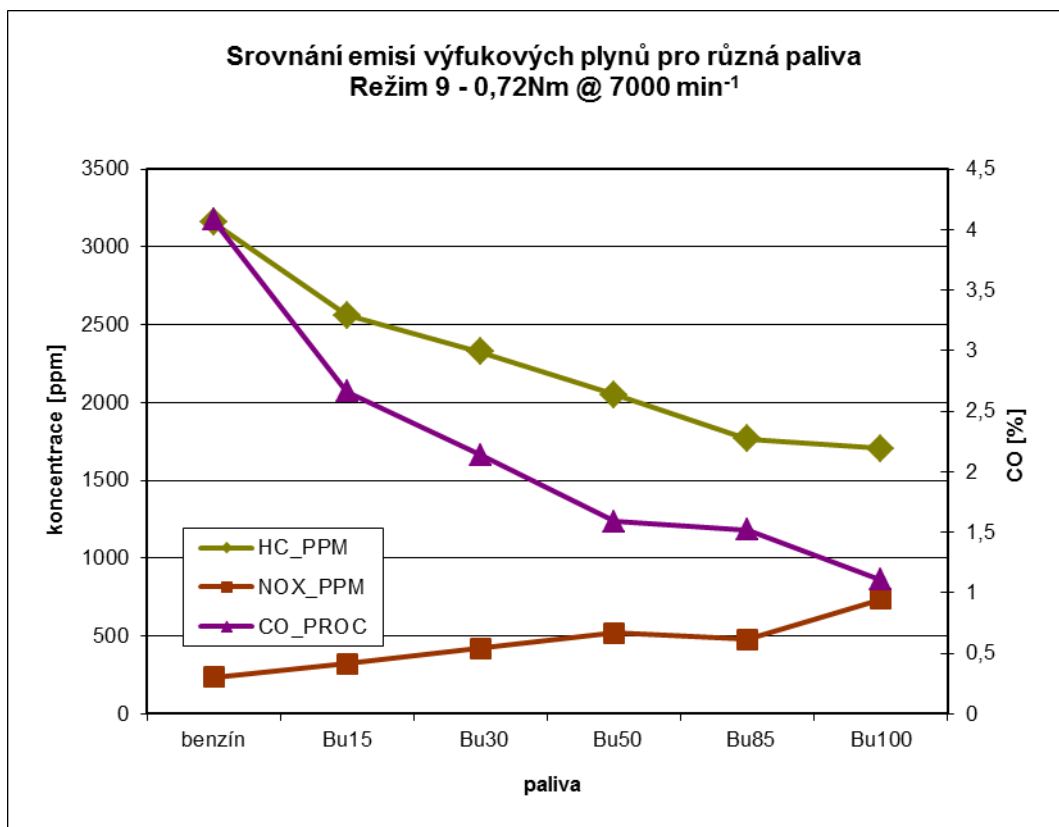
Příloha č. 2 - Srovnání emisí výfukových plynů

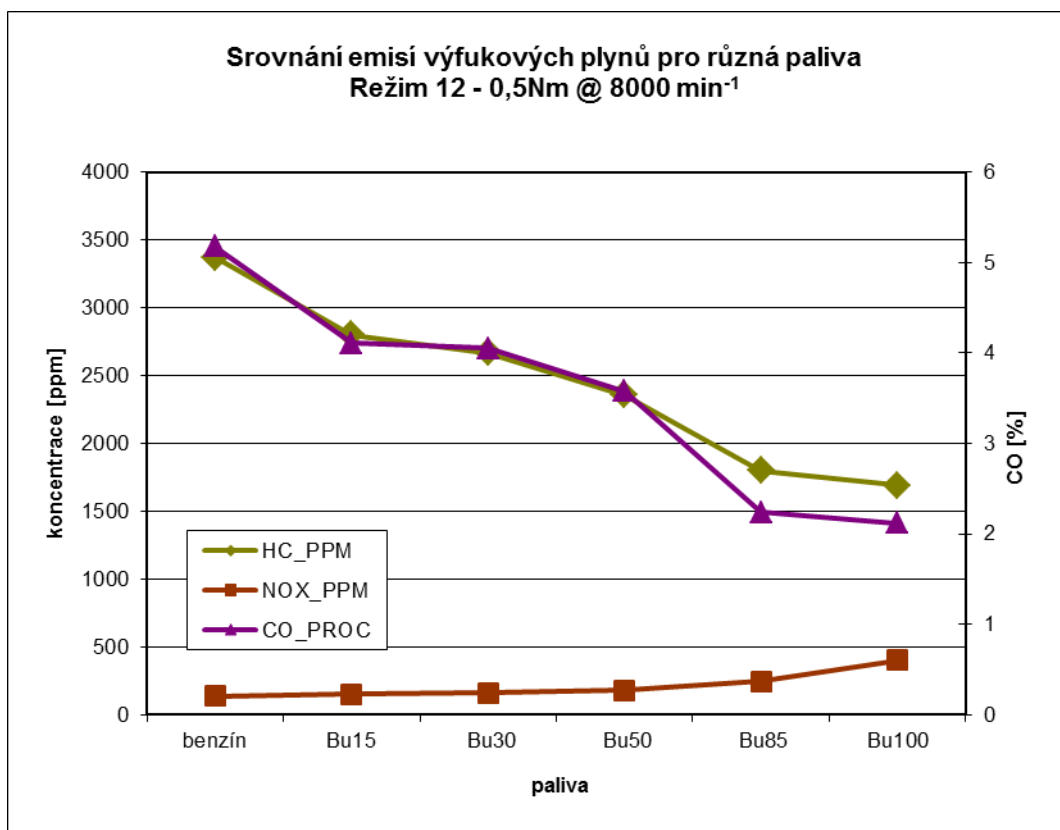
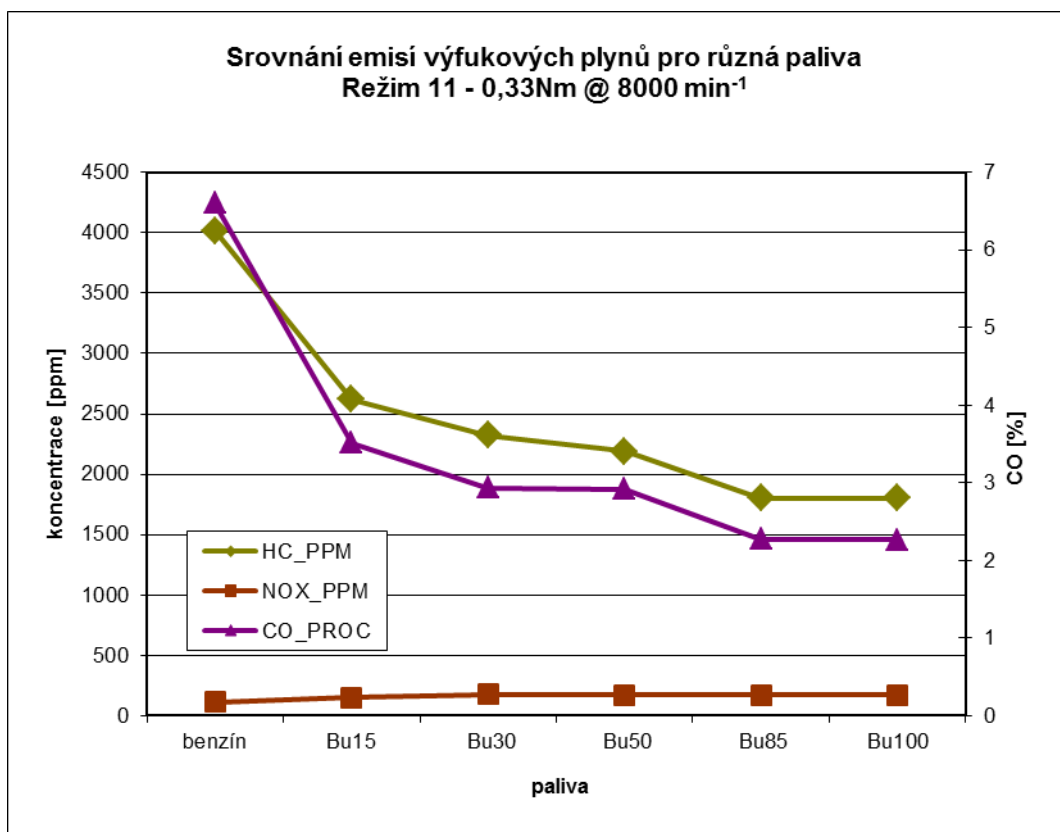


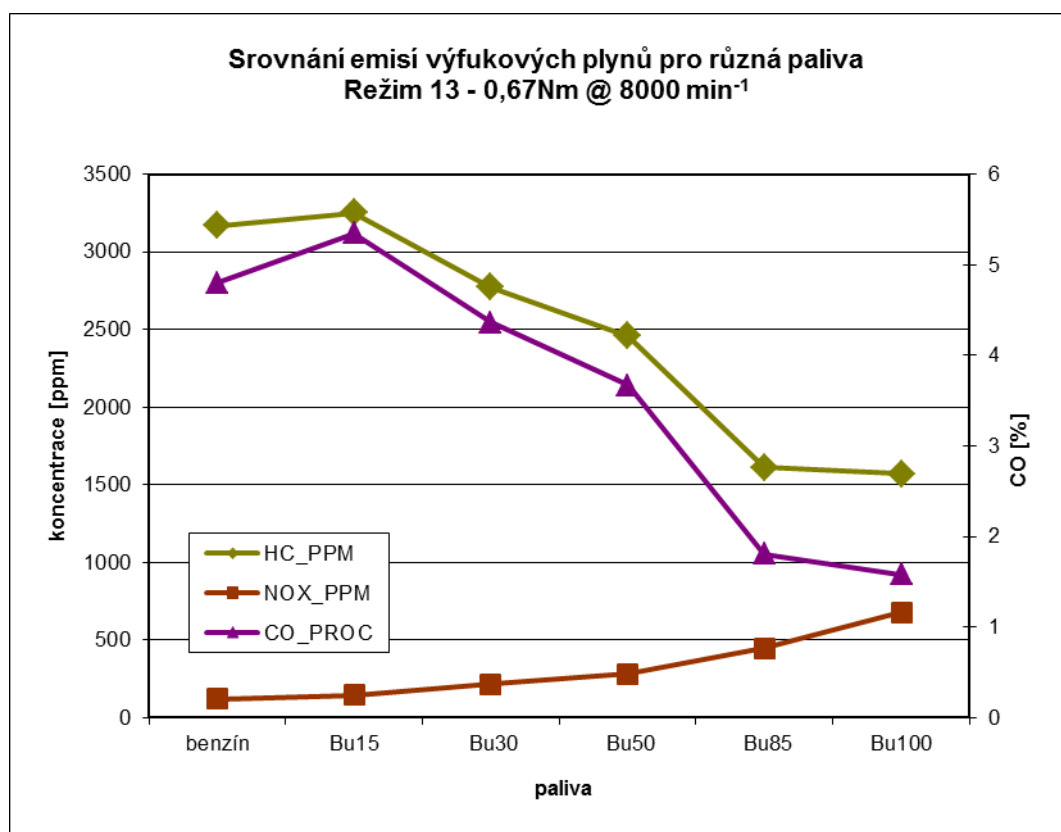












Příloha č. 3 - Teplota výfukových plynů

